

TUGAS AKHIR - TM 141585

**PEMODELAN DAN ANALISIS PENGARUH
PENAMBAHAN TUNED MASS DAMPER TERHADAP
RESPON GETARAN SISTEM TURBIN ANGIN
TIPE WES 80**

**PUTRI SARAH AIDA
NRP 2113 100 045**

**Dosen Pembimbing
Dr. Harus Laksana Guntur, ST., M.Eng.**

**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2017**



FINAL PROJECT – TM141585

**MODELING AND ANALYSIS OF THE EFFECT BY
ADDING TUNED MASS DAMPER TO VIBRATION
RESPONSE OF WIND TURBINE SYSTEM TYPE
WES 80**

PUTRI SARAH AIDA
NRP. 2113100045

Advisory Lecturer
Dr. Harus Laksana Guntur, ST., M.Eng.

BACHELOR PROGRAM
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA 2017



TUGAS AKHIR – TM141585

**PEMODELAN DAN ANALISIS PENGARUH
PENAMBAHAN TUNED MASS DAMPER
TERHADAP RESPON GETARAN SISTEM TURBIN
ANGIN TIPE WES 80**

PUTRI SARAH AIDA
NRP. 2113100045

Dosen Pembimbing:
Dr. Harus Laksana Guntur, ST., M.Eng.

PROGRAM SARJANA
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2017

**PEMODELAN DAN ANALISIS PENGARUH
PENAMBAHAN *TUNED MASS DAMPER* TERHADAP
RESPON GETARAN SISTEM TURBIN ANGIN TIPE
WES 80**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar
Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

PUTRI SARAH AIDA

NRP. 2113 100 045

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr Eng. Harus Laksana Guntur, ST, M.Eng. (Penasehat Pembimbing)
NIP. 197505111999031001
2. Dr. Wiwiek Hendrowati., S.T., M.T. (Penguji I)
NIP. 197004121997032003
3. Moch. Solichin., S.T., M.T. (Penguji II)
NIP. 198908172015041003
4. Achmad Syaifudin, S.T., M.Eng., Ph.D. (Penguji III)
NIP. 197909262005011001



SURABAYA

JULI, 2017

PEMODELAN DAN ANALISIS PENGARUH PENAMBAHAN TUNED MASS DAMPER TERHADAP RESPON GETARAN SISTEM TURBIN ANGIN TIPE WES 80

Nama Mahasiswa : Putri Sarah Aida
NRP : 2113100045
Departemen : Teknik Mesin FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Harus Laksana Guntur ST.,
M.Eng.

Abstrak

Dewasa ini, Tuned Mass Damper (TMD) merupakan salah satu alat kontrol getaran yang paling mudah dan paling terpercaya untuk mengurangi efek getar yang terjadi pada struktur pendukung turbin. Massa sistem yang terdistribusi secara seragam lebih efektif dalam mengurangi puncak faktor pembesaran dinamis dan massa sistem yang terdistribusi secara linear lebih kuat selama tidak terpasang sesuai.

Pada umumnya penambahan TMD diterapkan pada sejumlah gedung tinggi bertingkat. Namun pada tugas akhir ini dilakukan simulasi pada sistem turbin angin tipe WES 80. TMD dirancang dengan volume sebesar $0.6 \times 0.4 \times 0.4$ m. Pemodelan dinamis sistem dengan penambahan TMD disimulasikan pada software Simulink MATLAB. Ada 3 variasi Kecepatan kerja awal angin yang digunakan (V_0) adalah 5 m/s, 12 m/s, dan 18 m/s. Massa peredam (M_a) sebesar 5%, 7%, dan 9% dari massa utama (menara dan nacelle) disimulasikan dengan input sinusoidal yang mewakili rata-rata beban angin, dan input bump modified mewakili perubahan kecepatan angin mendadak tinggi.

Dari hasil simulasi didapatkan TMD dengan Massa Peredam 7% dan 9%, mampu mereduksi getaran paling baik di seluruh kecepatan angin. Sistem turbin angin TMD dengan input bump modified memiliki respon transient lebih lama daripada

sistem tanpa TMD. Sistem TMD tidak efektif bekerja untuk mereduksi getaran saat ada perubahan kecepatan angin mendadak tinggi sesaat.

Kata kunci :Tuned Mass Damper (TMD), respon dinamis, parameter, turbin angin, kecepatan angin, massa absorber.

MODELING AND ANALYSIS OF THE EFFECT BY ADDING TUNED MASS DAMPER TO VIBRATION RESPONSE OF WIND TURBINE SYSTEM TYPE WES 80

Name : Putri Sarah Aida
NRP : 2113100045
Department : Mechanical Engineering FTI-ITS
Advisory Lecturer : Dr. Harus Laksana Guntur ST.,
M.Eng

Abstract

Currently, Tuned Mass Damper (TMD) is one of the easiest and most reliable vibration control devices to reduce the vibration effects that occur in wind turbine support structures. The mass of uniformly distributed systems is more effective in reducing the peak of dynamic enlargement factors and the linearly distributed mass of the system more robust as long as it is not installed accordingly.

In general, the addition of TMD is applied to a number of high rise buildings. However, in this final project simulation on wind turbine system type WES 80. TMD has been designed with the volume of $0.6 \times 0.4 \times 0.4$ m. Dynamic modeling of systems with the addition of TMD is simulated on MATLAB Simulink software. There are 3 variations of the working speed of the wind used (V_o) is 5 m / s, 12 m / s, and 18 m / s. Mass dampers (M_a) of 5%, 7%, and 9% of the main mass (tower and nacelle) are simulated with sinusoidal inputs representing the average wind load, and the modified bump input represents a sudden high wind speed change.

From the simulation results obtained TMD with Mask Damper 7% and 9%, able to reduce the best vibrations in all variations of wind speed. The TMD wind turbine system with modified bump input has a longer transient response than a system without TMD.

The TMD system does not work effectively to reduce vibration when there is a sudden high speed change in the wind speed.

Keywords : Tuned Mass Damper (TMD), dynamic response, parameters, wind turbine, wind speed, mass absorber.

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah Subhanallahu Wa Ta'ala atas tuntunan-Nya penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini. Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan kelulusan pendidikan Sarjana S-1 di Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penyusunan Tugas Akhir ini dapat terlaksana dengan baik atas bantuan dan kerjasama dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Orangtua penulis, khususnya Bapak Samsul Arifin yang senantiasa mendoakan, mendorong, dan menyemangati penulis. Terimakasih kepada Ibu Jenny Muharti (Mande) karena telah menjadi ibu terbaik bagi penulis dan selalu memberikan doa serta dorongan dalam segala kondisi. Walaupun kata terimakasih tidak dapat berbalas budi untuk Mande.
2. Saudara kandung penulis, Ahmad Zainullah yang selalu mendoakan dan menjadi semangat penulis untuk segera menyelesaikan studinya. Saudara sepupu mulai dari yang tertua hingga termuda, Eri Hadiansyah, Mbak Tya, Uni Egin, dan Novia Nurul Faizah, atas doa restu untuk kelancaran penulis dalam menyelesaikan tugas akhir.
3. Makdang, Bude Erna, Om Yul, dan Tante Lia, selaku orang tua di keluarga besar Thaher, atas doa restu dan dorongan semangat serta masukan saat diskusi demi kelancaran tugas akhir penulis.
4. Dr. Harus Laksana Guntur, S.T., M.Eng. yang selalu memberikan bimbingan dan arahan dalam penulisan Tugas Akhir ini.
5. Dr. Wiwiek Hendrowati, ST, MT., Moch. Solichin, ST., MT., dan Achmad Syaifudin, S.T., M.Eng., Ph.D. selaku dosen penguji yang telah memberikan saran dan kritik kepada penulis tentang Tugas Akhir ini.

6. Segenap dosen dan karyawan Jurusan Teknik Mesin FTI ITS, atas ilmu yang telah diberikan kepada penulis selama ini.
7. Mas Prayogi Adista yang telah banyak memberikan bantuan, dukungan, dan ilmu baru dalam dunia modeling.
8. Teman-teman angkatan M56 yang selalu meramaikan grup LINE dan selalu memberikan informasi seputar apapun mulai dari hal tidak penting ke paling penting.
9. *Smart Ladies* yang merupakan sekelompok wanita sholeha selalu membantu penulis dalam kelancaran tugas akhir.
10. Sahabat terbaik penulis, Rizka Yoni Pramudita, selalu memberikan motivasi dan tempat berteduh ketika penulis mengalami kegundahan yang tidak tertahankan.
11. Teman-teman dekat penulis, Nabila Prastiya, Alvibrionasis Aseptis Dheninta, Fiky Nuzulla Darsono, Intan Kumala, Ayzam Sunainah, yang selalu menghibur penulis saat sedang hilang arah. Terimakasih pula kepada Arif Rachman yang telah menjadi teman baik untuk berbagi cerita selama ini.
12. Gembuls yang merupakan teman sepermainan, selalu menemani ketika butuh teman makan besar, teman curhat tentang kehidupan, dan kejadian yang aneh-aneh lainnya.
13. Wisnu gilang yang membuat suasana tegang menjadi lebih santai.
14. Teman Riset H.L.G sekaligus teman seperjuangan untuk lulus tugas akhir.
15. Teman-teman Lab. Vibrasi yang senantiasa menemani dan menghibur penulis saat sedang penat serta memberikan dukungan kepada penulis.

Dengan segala keterbatasan kemampuan serta pengetahuan penulis, tidak menutup kemungkinan Tugas Akhir ini jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis bersedia menerima kritik dan saran dari berbagai pihak untuk penyempurnaan lebih lanjut. Semoga hasil penulisan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi semua pihak.

Surabaya, Januari 2016

Penulis

DAFTAR ISI

Abstrak	i
Abstract.....	iii
Kata Pengantar.....	v
BAB I 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan.....	3
1.5 Manfaat.....	3
BAB II DASAR TEORI.....	5
2.1 Penelitian Terdahulu	5
2.2 Asal Energi Angin.....	18
2.2.1 Menghitung Kecepatan Angin Rata-Rata	20
2.3 Struktur Turbin Angin.....	20
2.3.1 Turbin Angin Sumbu Horizontal	21
2.4 Sistem Multi <i>Degree of Freedom</i>	25
2.4.2 <i>Dynamic Vibration Absorber</i> (DVA)	26
2.4.3 Damped Dynamic Vibration Absorber	28
2.5 Gaya Aerodinamik	31
BAB III METODE PENELITIAN.....	35
3.1 Metode Penelitian.....	35
3.1.1 Tahap Studi Literatur	37
3.1.2 Identifikasi Masalah.....	37
3.1.3 Perancangan TMD	37
3.1.4 Pemodelan Sistem Dinamis dan Penurunan Persamaan Gerak Sistem Turbin Angin Tanpa dan Dengan Menggunakan TMD	38
3.1.5 Pembuatan Blok Simulasi MATLAB Simulink 38	
3.1.6 Simulasi.....	38
3.1.7 Analisa Grafik dan Karakteristik Dinamis.....	39

3.2	Pemodelan Sistem Dinamis, Persamaan Gerak, dan Simulasi.....	39
3.2.1	Pemodelan Sistem Turbin Angin Tanpa <i>Tuned Mass Damper</i>	39
3.2.2	Pemodelan dan Simulasi Sistem Menggunakan TMD	46
3.2.3	Analisis Grafik Sistem Turbin Angin Menggunakan TMD	52
BAB IV HASIL ANALISA DAN PEMBAHASAN.....		55
4.1	Pemodelan Sistem Turbin Angin	55
4.2	Perancangan Mekanisme Sistem TMD.....	55
4.3	Pemodelan Sistem Turbin Angin dan TMD	56
4.3.1	Sistem turbin angin tanpa TMD	56
4.3.2	Sistem turbin angin dengan menggunakan TMD	61
4.4	Diagram Blok.....	67
4.4.1	Input yang digunakan	67
4.4.2	Diagram blok sistem turbin angin tanpa TMD.....	68
4.4.3	Diagram blok sistem turbin angin dengan menggunakan TMD	70
4.5	Analisa Pemodelan.....	71
4.5.1	Sistem turbin angin tanpa TMD	72
4.5.2	Sistem turbin angin dengan menggunakan TMD	79
4.6	Pembahasan.....	91
4.6.1	Sistem turbin angin tanpa TMD	91
4.6.2	Sistem turbin angin dengan menggunakan TMD	92
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....		99
5.1	Kesimpulan	99
5.2	Saran.....	100
Daftar Pustaka		xix

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 (a) skema tampak depan-belakang TMD pada <i>nacelle</i> dan (b) skema dari modul FAST.....	5
Gambar 2. 2 Model Struktur SDOF	7
Gambar 2. 3 Grafik dasar menara momen lentur untuk kasus dasar dan 10,000kg TMD.....	8
Gambar 2. 4 Konfigurasi Sistem Struktur Gedung 40 Lantai (NON-TMD)	10
Gambar 2. 5 Konfigurasi Sistem Struktur Gedung 40 Lantai <i>SINGLE TMD</i>	10
Gambar 2. 6 Konfigurasi Sistem Struktur Gedung 40 Lantai TMD Multi TMD	10
Gambar 2. 7 Momen akibat Respon Spectrum Wilayah 5	11
Gambar 2. 8 Gaya Geser akibat Respon Spectrum Wilayah 5	11
Gambar 2. 9 Skematik dari Peralatan Pengujian Untuk Menara Turbin Angin (Chen & Georgakis, 2013).....	13
Gambar 2. 10 <i>Tuned Rolling-ball Damper</i> dalam struktur SDOF (Single Degree of Freedom). (Chen & Georgakis, 2013).....	14
Gambar 2. 11(a) Respon dari base moment terhadap waktu tanpa <i>Rolling-ball</i> TMD dan penggunaan <i>Rolling-ball</i> TMD berjumlah satu dan enam buah bola saat “Overspeed” (b) Respon dari base moment terhadap waktu saat penggunaan <i>Rolling-ball</i> TMD berjumlah delapan dan sepuluh buah bola saat “Overspeed”. (Chen & Georgakis, 2013)	15
Gambar 2. 12(a) Respon dari base moment terhadap waktu tanpa <i>Rolling-ball</i> TMD dan penggunaan <i>Rolling-ball</i> TMD berjumlah satu dan enam buah bola saat “EOG” (b) Respon dari base moment terhadap waktu saat penggunaan <i>Rolling-ball</i> TMD berjumlah delapan dan sepuluh buah bola saat “EOG”. (Chen & Georgakis, 2013)	16
Gambar 2. 13(a) Respon dari base moment terhadap waktu tanpa <i>Rolling-ball</i> TMD dan penggunaan <i>Rolling-ball</i> TMD berjumlah satu dan enam buah bola saat “Parking” (b) Respon dari base moment terhadap waktu saat penggunaan <i>Rolling-ball</i> TMD	

berjumlah delapan dan sepuluh buah bola saat “Parking”. (Chen & Georgakis, 2013)	17
Gambar 2. 14 Gambar <i>Nacelle</i> Turbin Angin Sumbu Horizontal	22
Gambar 2. 15 Turbin Angin Sumbu Horizontal (TASH) (Napitupulu & Napitupulu, 2014)	22
Gambar 2. 16 Turbin Angin Tipe WES 80 (Tubular Steel Tower) (Anon., 2003).....	23
Gambar 2. 17 Skema forced multi dof vibration (Rao, 2011)	25
Gambar 2. 18 Kostruksi Tuned mass damper di turbin angin (Stewart & Lackner, 2014)	26
Gambar 2. 19 Pemodelan Fisik <i>Tuned Mass Damper</i> (TMD) pada Turbin Angin (Deicon, t.thn.)	27
Gambar 2. 20 Permodelan dinamis sistem utama dengan damped DVA (Rao, 2011)	29
Gambar 2. 21 Pengaruh dari <i>damped dynamic vibration absorber</i> terhadap respon dari sistem utama (Rao, 2011)	31
 Gambar 3. 1 Diagram alir analisa sistem turbin angin tanpa dan dengan menggunakan <i>Tuned Mass Damper</i>	36
Gambar 3. 2 Diagram alir penurunan persamaan gerak dari sistem turbin angin tanpa TMD	39
Gambar 3. 3(a) Model Fisik Turbin Angin Horizontal dan (b) Model Dinamis Turbin Angin Horizontal Tanpa TMD	41
Gambar 3. 4 Model Matematis dan <i>free body diagram</i> massa 2 (baling-baling turbin angin).....	42
Gambar 3. 5 Model Matematis dan <i>free body diagram</i> massa 1 (menara turbin angin)	43
Gambar 3. 6 Diagram alir pembuatan blok diagram Simulink dari sistem turbin angin tanpa TMD dengan variasi kecepatan awal angin (V_{oi}) sebesar 3 m/s.	45
Gambar 3. 7 Diagram alir persamaan gerak dari sistem turbin angin dengan menggunakan TMD	46

Gambar 3. 8(a) Model Fisik Turbin Angin Horizontal dan (b) Model Dinamis Turbin Angin Horizontal dengan Menggunakan TMD	47
Gambar 3. 9 Model Matematis dan <i>free body diagram</i> massa 2 (baling-baling turbin angin).....	48
Gambar 3. 10 Model Matematis dan <i>free body diagram</i> massa 1 (menara turbin angin)	49
Gambar 3. 11 Model Matematis dan <i>free body diagram</i> massa a (massa absorber).....	50
Gambar 3. 12 diagram alir pembuatan blok diagram Simulink sistem utama dengan penambahan <i>Tuned Mass Damper</i> dengan variasi massa peredam (M_a) dengan kecepatan awal angin (V_o) konstan yaitu sebesar 5 m/s.	52
Gambar 4. 1 Rancangan Mekanisme Sistem Turbin Angin sebagai Sistem Utama	55
Gambar 4. 2 Rancangan Penambahan <i>Tuned Mass Damper</i> pada Bagian <i>Nacelle</i> Turbin Angin.....	56
Gambar 4. 3 Model Dinamis Sistem Turbin Angin	57
Gambar 4. 4 Model Matematis dan <i>free body diagram</i> massa 2 (baling-baling turbin angin).....	58
Gambar 4. 5 Model Matematis dan <i>free body diagram</i> massa 1 (menara turbin angin)	59
Gambar 4. 6 Pemodelan Fisik dari Sistem Turbin Angin dengan Penambahan TMD.....	61
Gambar 4. 7 Model Matematis dan <i>free body diagram</i> massa 2 (baling-baling turbin angin).....	62
Gambar 4. 8 Model Matematis dan <i>free body diagram</i> massa 1 (menara turbin angin)	63
Gambar 4. 9 Model Matematis dan <i>free body diagram</i> massa a (massa absorber).....	64
Gambar 4. 10 Kecepatan Angin dengan input sinusoidal	68
Gambar 4. 11 Diagram Blok Untuk Sistem Turbin Angin Tanpa TMD	69

Gambar 4. 12 Diagram Blok Untuk Input <i>Bump</i> yang Dimodifikasi	69
Gambar 4. 13 Diagram Blok Untuk Sistem Turbin Angin dengan Penambahan TMD.....	70
Gambar 4. 14 Diagram Blok Untuk Input <i>Bump</i> yang Dimodifikasi	71
Gambar 4. 15 Grafik Respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, dan (c) percepatan dari massa utama tanpa TMD dengan input sinusoidal	73
Gambar 4. 16 Grafik Respon Perpindahan Massa Utama (X_1) tanpa TMD dengan Variasi Kecepatan Angin.....	74
Gambar 4. 17 <i>Bode Diagram</i> Sistem Turbin Angin Tanpa TMD dengan Variasi Kecepatan Angin	75
Gambar 4. 18 Grafik Respon Kecepatan dari Massa Utama (\dot{x}_1) dengan Variasi Kecepatan Angin	75
Gambar 4. 19 Grafik Respon Percepatan dari Massa Utama (\ddot{x}_1) dengan Variasi Kecepatan Angin	76
Gambar 4. 20 Grafik Respon perpindahan dari Massa Utama dengan penambahan TMD yang diberi Input <i>bump modified</i> (a) $\gamma = 1$, (b) $\gamma = 5$, (c) $\gamma = 20$ pada kecepatan angin sebesar 5m/s, 12m/s, dan 18m/s.....	78
Gambar 4. 21 Grafik Respon (a) perpindahan, (b) Kecepatan, dan (c) Percepatan dari massa utama dengan menggunakan TMD....	80
Gambar 4. 22 Grafik Respon perpindahan dengan menggunakan TMD (a) $M_a=5\%$, (b) $M_a=7\%$, dan (c) $M_a=9\%$ dari sistem utama saat kecepatan angin 5m/s	82
Gambar 4. 23 Grafik Respon perpindahan dengan menggunakan TMD (a) $M_a=5\%$, (b) $M_a=7\%$, dan (c) $M_a=9\%$ dari sistem utama saat kecepatan angin 12m/s	83
Gambar 4. 24 Grafik Respon perpindahan dengan menggunakan TMD (a) $M_a=5\%$, (b) $M_a=7\%$, dan (c) $M_a=9\%$ dari sistem utama saat kecepatan angin 18m/s	85
Gambar 4. 25 <i>bode diagram</i> sistem utama dengan penambahan TMD saat kecepatan angin bernilai (a) 5 m/s, (b) 12 m/s, dan (c) 18 m/s dengan variasi massa perdam	87

Gambar 4. 26 Grafik Respon perpindahan saat kecepatan angin dari Massa Utama dengan penambahan TMD yang diberi Input <i>bump modified</i> (a) $\gamma = 1$, (b) $\gamma = 5$, (c) $\gamma = 20$ pada kecepatan angin sebesar 12m/s.....	90
Gambar 4. 27 Grafik Respon RMS perpindahan dari massa utama dengan penambahan TMD 5% variasi K_a dan C_a terhadap perubahan kecepatan angin	95
Gambar 4. 28 Grafik Respon RMS perpindahan dari massa utama dengan penambahan TMD 7% variasi K_a dan C_a terhadap perubahan kecepatan angin	96
Gambar 4. 29 Grafik Respon RMS perpindahan dari massa utama dengan penambahan TMD 9% variasi K_a dan C_a terhadap perubahan kecepatan angin	96
Gambar 4. 30 Grafik reduksi perpindahan terbesar (%) berdasarkan variasi massa TMD	98

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Parameter fisik dari turbin NREL 5 MW	7
Tabel 2. 2 Parameter optimal TMD untuk NREL 5 MW didukung oleh monopile.....	8
Tabel 2. 3 Kondisi Angin	18
Tabel 2. 4 Tingkat Kecepatan Angin 10m di Atas Permukaan Tanah.....	19
Tabel 3. 1 Parameter sistem utama tanpa TMD	44
Tabel 3. 2 Parameter sistem utama dengan tuned mass damper	50
Tabel 4. 1 Frekuensi Natural Sistem Turbin Angin dengan Menggunakan TMD Variasi Nilai K_a dan C_a	66
Tabel 4. 2 Nilai perpindahan, kecepatan, dan percepatan maksimum pada turbin angin terhadap waktu dengan input bump modified.	78
Tabel 4. 3 Nilai perpindahan, kecepatan, dan percepatan maksimum pada turbin angin terhadap waktu dengan input bump modified.	90
Tabel 4. 4 Nilai RMS Perpindahan, Kecepatan, dan Percepatan dari Massa Utama dengan Menggunakan TMD Variasi Massa Peredam 5%, $K_a = 50200.25\text{N/m}$, dan $C_a = 1344.023\text{N.s/m}$	92
Tabel 4. 5 Nilai RMS Perpindahan, Kecepatan, dan Percepatan dari Massa Utama dengan Menggunakan TMD Variasi Massa Peredam 5%, $K_a = 69999.79\text{N/m}$, dan $C_a = 1877.872\text{N.s/m}$	92
Tabel 4. 6 Nilai RMS Perpindahan, Kecepatan, dan Percepatan dari Massa Utama dengan Menggunakan TMD Variasi Massa Peredam 5%, $K_a = 88135.62\text{N/m}$, dan $C_a = 2389.272\text{N.s/m}$	93
Tabel 4. 7 Nilai RMS Perpindahan, Kecepatan, dan Percepatan dari Massa Utama dengan Menggunakan TMD Variasi Massa Peredam 7%, $K_a = 50200.25\text{N/m}$, dan $C_a = 1344.023\text{N.s/m}$	93

Tabel 4. 8 Nilai RMS Perpindahan, Kecepatan, dan Percepatan dari Massa Utama dengan Menggunakan TMD Variasi Massa Peredam 7%, $K_a = 69999.79\text{N/m}$, dan $C_a = 1877.872\text{N.s/m}$	93
Tabel 4. 9 Nilai RMS Perpindahan, Kecepatan, dan Percepatan dari Massa Utama dengan Menggunakan TMD Variasi Massa Peredam 7%, $K_a = 88135.62\text{N/m}$, dan $C_a = 2389.272\text{N.s/m}$	94
Tabel 4. 10 Nilai RMS Perpindahan, Kecepatan, dan Percepatan dari Massa Utama dengan Menggunakan TMD Variasi Massa Peredam 9%, $K_a = 50200.25\text{N/m}$, dan $C_a = 1344.023\text{N.s/m}$	94
Tabel 4. 11 Nilai RMS Perpindahan, Kecepatan, dan Percepatan dari Massa Utama dengan Menggunakan TMD Variasi Massa Peredam 9%, $K_a = 69999.79\text{N/m}$, dan $C_a = 1877.872\text{N.s/m}$	94
Tabel 4. 12 Nilai RMS Perpindahan, Kecepatan, dan Percepatan dari Massa Utama dengan Menggunakan TMD Variasi Massa Peredam 9%, $K_a = 88135.62\text{N/m}$, dan $C_a = 2389.272\text{N.s/m}$	95

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia memiliki total garis pantai mencapai 81.000 km dengan kecepatan angin rata-rata 3,5 m/s, bahkan di beberapa tempat mencapai 10 m/s. Potensi besar seperti ini dapat dijadikan energi terbarukan jika dimanfaatkan secara maksimal. Salah satunya pembangkit listrik tenaga angin menggunakan turbin angin yang mana merupakan pembangkit listrik yang murah, ramah lingkungan, dan memungkinkan untuk didirikan di pelosok kota terpencil. Banyak macam jenis turbin angin dispesifikasikan dan dikembangkan berdasarkan pasangan *blade* dan konfigurasi struktur pendukung. Penggunaan turbin angin sebagai alat bantu pembangkit listrik terbarukan ini tidak berarti tidak mempunyai masalah baru yang ditimbulkan (Bagaskara, 2008).

Ada 2 jenis turbin angin berdasarkan sumbu putar sudu turbin yaitu Turbin Angin Sumbu Horizontal (TASH) dan Turbin Angin Sumbu Vertikal (TASV). Kedua jenis turbin ini mengalami masalah getaran yang timbul pada struktur pendukung turbin diakibatkan oleh beban berat di bagian atas turbin dan laju kecepatan angin yang semakin besar saat struktur pendukung turbin tersebut dibuat semakin tinggi. Permasalahan tersebut dapat menimbulkan penurunan kinerja turbin dan kerusakan fisik yang terlihat kasat mata contohnya seperti, kerusakan pada komponen-komponen turbin, terjadi polusi suara atau bunyi di sekitar turbin, penurunan drastis pada efisiensi turbin, penurunan daya hasil produksi.

Massa sistem yang terdistribusi secara seragam lebih efektif dalam mengurangi puncak faktor pembesaran dinamis dan massa sistem yang terdistribusi secara linear lebih kuat selama tidak terpasang sesuai (Stewart & Lackner, 2014). Ada

juga penelitian tentang kenyamanan daripada *Tuned Mass Damper* (TMD) yang digunakan untuk mengurangi dampak hembusan terhadap jembatan suspensi struktur pendukung dan menyarankan untuk mengadopsi dari penyelesaian multi-TMD. Semua peredam ini telah dilaporkan dapat mengurangi respon dinamis struktur. Namun dalam pemasangan TMD dibutuhkan analisa massa peredam yang efektif pada struktur turbin untuk memaksimalkan fungsi dari TMD itu sendiri.

Peredam getaran pada struktur turbin angin biasanya digunakan dengan menambahkan TMD. Hal tersebut diterapkan pada tugas akhir ini dengan berbagai parameter seperti massa peredam, konstanta pegas dan peredam dari sistem turbin angin akan mempengaruhi respon getaran dari sistem tersebut. Oleh karena itu, dalam tugas akhir ini, penulis akan memodelkan sistem turbin angin dengan metode TMD untuk *Single DOF* (*SDOF*) dalam meredam getaran khususnya untuk menara turbin angin sumbu horizontal.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana pengaruh penambahan massa peredam terhadap respon dinamis yang terjadi pada struktur pendukung turbin angin ?
2. Bagaimana membandingkan respon dinamis saat kondisi tanpa peredam dengan peredam pada struktur pendukung turbin angin ?
3. Bagaimana pengaruh fluktuasi beban angin terhadap respon dinamis yang terjadi pada struktur pendukung turbin angin?

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Struktur pendukung turbin adalah tipe *Turbular Steel Tower*.
2. Beban lingkungan yang dianalisa adalah angin.
3. Massa peredam yang digunakan sebanyak 1 buah.
4. Analisa getaran hanya dilakukan pada menara turbin.
5. Parameter yang digunakan dalam simulasi didapat berdasarkan literatur.
6. Sistem dimodelkan sebagai sistem massa mengumpul.
7. Material struktur pendukung turbin angin homogen.

1.4 Tujuan

Adapun tujuan dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui pengaruh penambahan massa peredam terhadap respon dinamis yang terjadi pada struktur pendukung turbin angin.
2. Membandingkan respon dinamis saat kondisi tanpa peredam dengan peredam pada struktur pendukung turbin angin.
3. Mengetahui fluktuasi beban angin terhadap respon dinamis yang terjadi pada struktur pendukung turbin angin.

1.5 Manfaat

Adapun manfaat dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

Hasil tugas akhir ini dapat menjadi dasar dalam merancang TMD untuk mereduksi getaran pada turbin angin tipe WES 80.

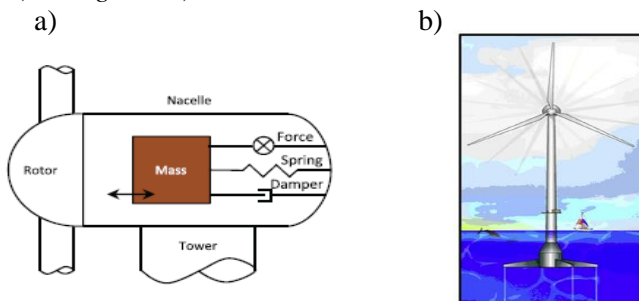
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB II

DASAR TEORI

2.1 Penelitian Terdahulu

Analisa pemodelan dan simulasi penggunaan *Tuned Mass Damper* (TMD) pernah dilakukan oleh Gordon M. Stewart pada tahun 2014. Dia menganalisa turbin angin lepas pantai yang mana mengalami pembebanan dari luar dan bermacam-macam sumber beban, khususnya dari beban angin dan gelombang laut. Benua Eropa dan Amerika menunjukkan bahwa angin dan gelombang laut tidak selalu memiliki arah yang sejajar dengan posisi turbin angin. Tidak sejajarnya posisi ini menyebabkan beban besar pada menara ke arah sisi-sisi yang memiliki sangat sedikit redaman struktural dibandingkan dengan arah depan-belakang. Pada penelitian Gordon, dilakukan pendekatan alternatif menggunakan kontrol struktural, dimana TMD *passive* digunakan untuk meredam dan menghilangkan getaran struktural. Khususnya, studi ini mengkaji potensi daripada TMD dalam mengurangi beban untuk turbin angin lepas pantai 5 MW yang ditumpu oleh sebuah monopile, dan mengalami kondisi eksternal yang realistis, termasuk posisi angin dan gelombang yang arahnya tidak sejajar (*misalignment*).



Gambar 2. 1 (a) skema tampak depan-belakang TMD pada *nacelle* dan (b) skema dari modul FAST

Pada sesi ini, konsep dari *tuned mass damper* diilustrasikan dengan menggunakan sistem dua massa yang ada pada gambar 2.1. Maka, tulisan “d” mewakili *tuned mass damper*; struktur diidealkan sebagai derajat kebebasan tunggal. Memperkenalkan notasi berikut :

$$\omega^2 = \frac{k}{m} \quad (2.13)$$

$$c = 2\zeta\omega m \quad (2.14)$$

$$\omega_d^2 = \frac{k_d}{m_d} \quad (2.15)$$

$$c_d = 2\zeta_d\omega_d m_d \quad (2.16)$$

Dimana : m = massa dari struktur SDOF

m_d = massa dari *damper*

ω = frekuensi natural struktur

ζ = rasio redaman struktur

ω_d = rasio frekuensi natural *damper*

ζ_d = rasio redaman *damper*

dan definisi \bar{m} sebagai rasio massa damper dengan massa,

$$\bar{m} = \frac{m_d}{m} \quad (2.17)$$

Sehingga persamaan gerak SDOF yang terjadi adalah sebagai berikut:

$$m\ddot{u} + (2\zeta\omega m)\dot{u} + (\omega^2 m)u = P \quad (2.18)$$

Kemudian masukkan persamaan dengan massa (m),

$$\ddot{u} + (2\zeta\omega)\dot{u} + (\omega^2)u = \frac{P}{m} \quad (2.19)$$

Karena persamaan gaya $P = -m.a$

Dimana : P = gaya

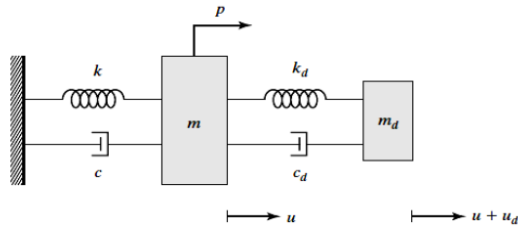
m = massa

$a = \ddot{u}$ = percepatan

maka persamaan (2.19) menjadi :

$$\ddot{u} + (2\zeta_d \omega_d) \dot{u} + (\omega^2) u = -\ddot{u} \quad (2.20)$$

Untuk persamaan gerak TMD adalah



$$\ddot{u}_d + (2\zeta_d \omega_d) \dot{u}_d + (\omega_d^2) u_d = -\ddot{u} \quad (2.21)$$

Gambar 2. 2 Model Struktur SDOF

Parameter yang diberikan pada pemodelan ini adalah sebagai berikut :

Tabel 2. 1 Parameter fisik dari turbin NREL 5 MW

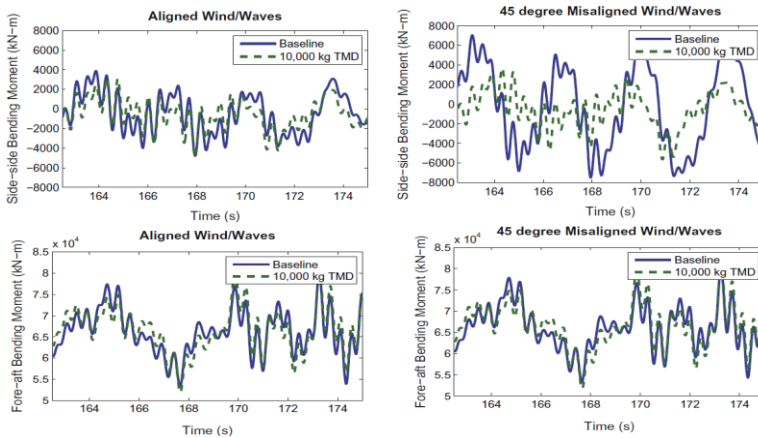
Rating	5 MW
Rotor Orientation, Configuration	Upwind, 3 Blades
Control	Variable Speed, Collective Pitch
Drivetrain	High Speed, Multiple-Stage Gearbox
Rotor, Hub Diameter	126 m, 3 m
Hub Height	90 m
Cut-In, Rated, Cut-Out Wind Speed	3 m/s, 11.4 m/s, 25 m/s
Cut-In, Rated Rotor Speed	6.9 rpm, 12.1 rpm
Rated Tip Speed	80 m/s
Overhang, Shaft Tilt, Precone	5 m, 5°, 2.5°
Rotor Mass	110,000 kg
Nacelle Mass	240,000 kg
Tower and Monopile Mass	522,617 kg
Nacelle Dimensions	18 m × 6 m × 6 m

Tabel 2. 2 Parameter optimal TMD untuk NREL 5 MW didukung oleh monopile

Mass (kg)	k (N/m)	d (N/(m/s))	ω_n (Hz)	ω_d (Hz)	ζ (%)
10,000	28,805	2800	0.270	0.269	8.3
20,000	54,274	7414	0.262	0.259	11.3

Dari penelitian analisa dan pemodelan dengan TMD menggunakan *software Matlab*, didapatkan hasil untuk dampak penambahan TMD bahwa pada beban dasar menara, beban bagian depan dan belakang *nacelle* lebih besar daripada beban bagian samping, tetapi karena analisisnya mencakup arah datang yang tidak sejajar (*misalignment*) antara gelombang laut dan angin, maka beban sisi (*side-to-side loads*) juga penting untuk diperhitungkan.

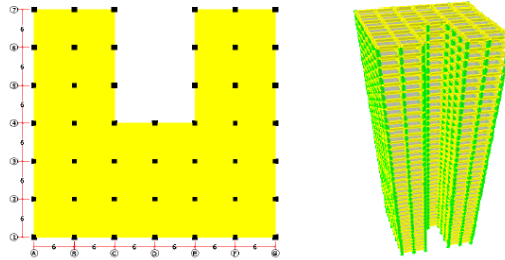
Plot *time series* ditunjukkan pada grafik 2.3, yang dibandingkan dengan momen lentur di menara bagian depan-belakang (*fore-aft*) dan *side-to-side* untuk kasus dasar dan 10,000kg, 0° susunan pada dua kondisi simulasi tertentu dimana masing-masing nilai $v = 10\text{m/s}$, $\beta_1 = 0^\circ$ dan $\beta_2 = 45^\circ$.



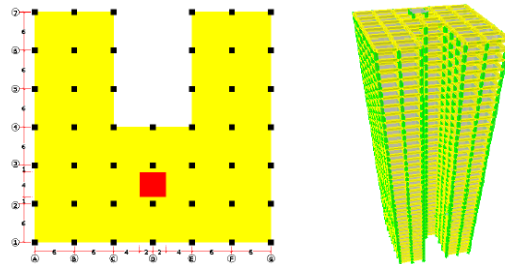
Gambar 2. 3 Grafik dasar menara momen lentur untuk kasus dasar dan 10,000kg TMD

Pada grafik di atas menunjukkan bahwa penambahan TMD mengurangi beban *fore-aft* sekitar 4-6%, sementara beban *side-to-side* tereduksi lebih dari 40%. Gerakan *fore-aft* dari menara teredam oleh gaya aerodinamis pada rotor, tapi karena terjadi redaman yang sangat kecil pada arah *side-to-side*, penambahan TMD memiliki dampak lebih besar terhadap beban *side-to-side*. Hasil grafik di atas dapat juga menunjukkan bahwa reduksi beban cukup sensitif terhadap massa dan peninjauan terhadap TMD. TMD yang lebih berat memiliki pengurangan getar yang lebih besar, tetapi pengembangan dalam jumlah kecil yang mana dari penambahan masa TMD lebih kecil daripada memulai dengan sebuah TMD sederhana. Itu terlihat jelas bahwa untuk menyimpan biaya dan tempat, sebuah TMD yang lebih kecil dapat diterapkan. (Stewart & Lackner, 2014)

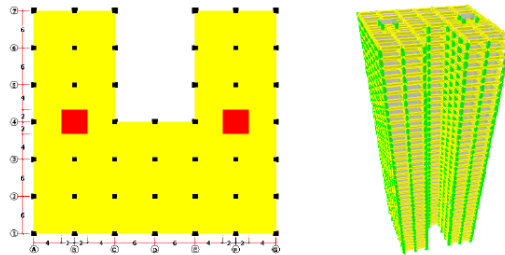
Penelitian selanjutnya adalah mengenai efektifitas penggunaan TMD untuk mengurangi pengaruh beban gempa pada struktur bangunan tinggi dengan *layout* bangunan berbentuk “U” oleh Jati Sumaryati, Rudy Ferial, dan Dicky Febri Hadi. Pemasangan TMD pada struktur biasanya adalah pada bangunan-bangunan tinggi dengan *layout* berbentuk bujursangkar. Respons struktur yang dipelajari adalah gaya dalam, deformasi dan periode dari struktur tanpa dan dengan TMD pada bangunan 40 lantai. Massa TMD ditetapkan sebesar 1%, 2%, dan 3% dari massa struktur utamanya. Tipe TMD dibagi menjadi 2 (dua), terdiri dari 1 TMD (*Single TMD*) dan 2 TMD (*Multi TMD*) yang diletakkan di lantai paling atas bangunan gedung. Dari tiap kasus di atas akan diperoleh seberapa besar reduksi pengaruh beban gempa pada bangunan. Konfigurasi sistem strukturnya serta dimensi direndanakan sendiri dengan mengusahakan volume elemen struktur tambahan dari masing-masing tipe struktur sama atau hampir sama.



Gambar 2. 4 Konfigurasi Sistem Struktur Gedung 40 Lantai
(NON-TMD)

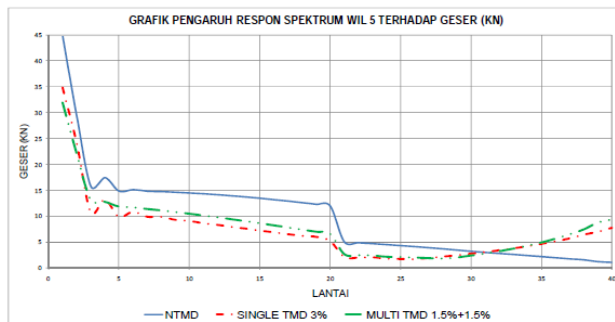


Gambar 2. 5 Konfigurasi Sistem Struktur Gedung 40 Lantai
SINGLE TMD

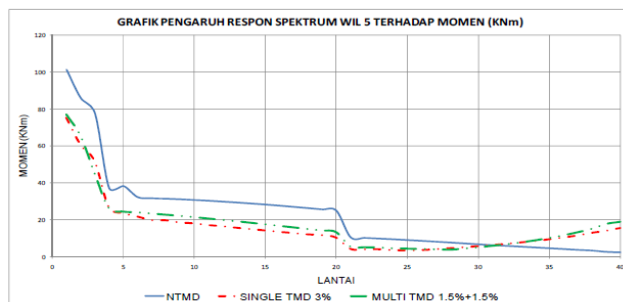


Gambar 2. 6 Konfigurasi Sistem Struktur Gedung 40 Lantai TMD
Multi TMD

Dari simulasi sistem didapatkan hasil dari penambahan beban *Tuned Mass Damper* (TMD) sebagai tujuan untuk mereduksi deformasi maksimum bangunan juga akan mempengaruhi gaya-gaya dalam. Dalam penelitian ini akan diperlihatkan pengaruh dari penggunaan TMD berdasarkan tingkat rasio massa TMD terhadap bangunan. Dalam hal ini, TMD yang diuji memiliki variasi dengan rasio massa 1%, 2%, 3%. Jenis TMD antara lain tidak menggunakan TMD (NTMD), *singleTMD* dan *multiTMD*. Untuk lebih memperakurat data, beban dinamis yang digunakan adalah beban dari *respon spectrum* wilayah 5. Dari jenis beban ini akan terlihat jelas pengaruh penggunaan TMD terhadap gaya dalam.



Gambar 2. 7 Momen akibat Respon Spektrum Wilayah 5 (NTMD, SingleTMD 3%, MultiTMD 1.5%+1.5%)

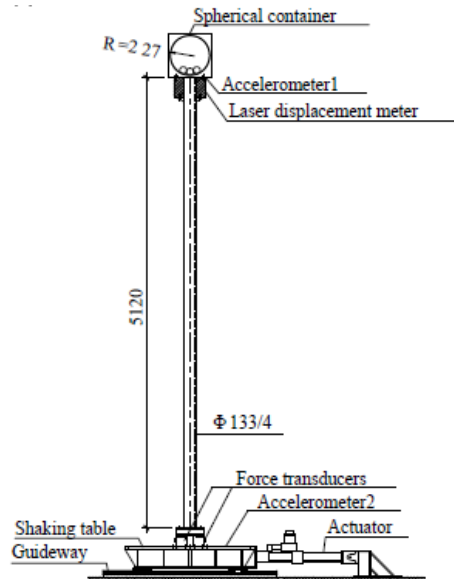


Gambar 2. 8 Gaya Geser akibat Respon Spektrum Wilayah 5 (NTMD, SingleTMD 3%, MultiTMD 1.5%+1.5%)

Dari grafik tersebut terlihat rata-rata kurva bangunan yang tidak memakai Tuned Mass Damper (NTMD) berada di posisi paling atas dari bangunan yang memakai TMD. Selanjutnya juga terlihat bangunan menggunakan TMD dengan rasio 3% berada di posisi paling bawah. Pada jenis beban dinamis yang digunakan (beban gempa wilayah 5), selalu terlihat urutan kurva mulai paling atas hingga paling bawah dimulai dari NTMD, TMD 1%, TMD 2% hingga TMD 3% baik pada singleTMD maupun multiTMD. Pada Gambar 2.7 dan Gambar 2.8 juga dapat dibandingkan, bahwa penggunaan singleTMD lebih efektif dari penggunaan multiTMD. Dapat dilihat bahwa grafik singleTMD berada di bawah multiTMD. Adanya TMD pada puncak bangunan juga mengakibatkan naiknya nilai gaya dalam pada beberapa lantai teratas, hal ini dikarenakan beban TMD itu sendiri. Dari analisa grafik di atas, dapat disimpulkan bahwa semakin besar beban TMD yang digunakan, maka gaya dalam struktur yang dihasilkan akan semakin kecil (gaya dalam berkurang). Penggunaan TMD untuk bangunan gedung tinggi dengan layout bangunan berbentuk "U" lebih efektif. Hal ini terjadi karena cara kerja TMD yang terjadi ketika bangunan berdeformasi horizontal, TMD akan bergerak berlawanan arah dari deformasi horizontal bangunan sehingga mengurangi dampak dari beban horizontal yang bekerja pada bangunan. Karena pengurangan nilai beban horizontal inilah akan menyebabkan gaya dalam pada bangunan juga berkurang. (Hadi, et al., 2009)

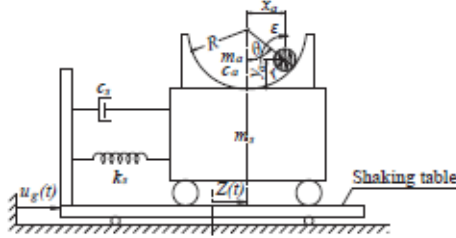
Selain pada bangunan, ada juga penelitian terdahulu berupa pengaruh TMD tipe *Tuned Rolling-Ball Damper* pada menara turbin angin tahun 2009, pemodelan dan simulasi telah dibahas oleh Junling Chen dan Christos T.Georgakis. Dalam jurnalnya dipaparkan bahwa analisa getaran pada menara turbin angin menggunakan DVA (Dynamic Vibration Absorber) berupa *tuned mass damper*. Penambahan massa yang digunakan adalah massa berupa bola pejal yang dapat berputar dengan banyak derajat kebebasan di dalam sebuah wadah. Jumlah dari bola pejal yang digunakan dalam penelitian ini bervariasi. Penambahan massa

berupa bola pejal ini disebut dengan *Tuned Rolling-ball Dampers*. Penggunaan TMD (Tuned Mass Damper) di dalam penelitian ini adalah karena ia merupakan salah satu dari banyaknya alat kontrol pasif yang paling sederhana.



Gambar 2. 9 Skematik dari Peralatan Pengujian Untuk Menara Turbin Angin (Chen & Georgakis, 2013)

Digunakan untuk melakukan simulasi ini adalah *shaking table* yang bergerak dalam arah horizontal menggunakan sistem hidrolik servo. Peredam ini menggunakan bola baja tunggal dan banyak yang berputar di dalam permukaan wadah. Sistem ini disederhanakan menjadi SDOF (Single Degree of Freedom).



Gambar 2. 10 *Tuned Rolling-ball Damper* dalam struktur SDOF (Single Degree of Freedom). (Chen & Georgakis, 2013)

Penyederhaan sistem pada gambar 2.10, arah perpindahan relatif untuk bola pejal kearah sumbu x sebesar $X(\theta) = R \sin \theta$ dan untuk kearah sumbu y sebesar $Y(\theta) = R(1 - \cos \theta)$. Sedangkan, untuk energi kinetik dan potensial dari sistem ini seperti persamaan 2.1, 2.2, dan 2.3.

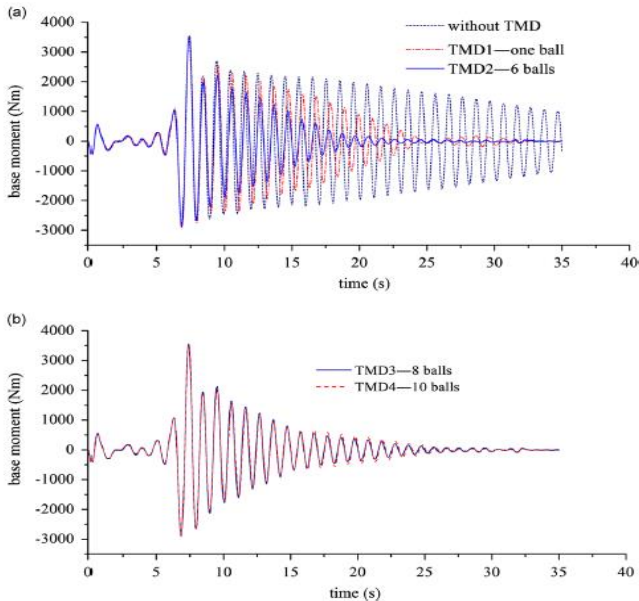
$$T = \frac{1}{2} m_s [\dot{Z} + \dot{u}_g]^2 + \frac{1}{2} m_a [\dot{Z} + \dot{u}_g + (R - r) \cos \theta \cdot \dot{\theta}]^2 + \frac{1}{2} m_a [(R - r) \sin \theta \cdot \dot{\theta}]^2 + \frac{1}{2} I_a \dot{\theta}^2 \left(\frac{R-r}{r} \right)^2$$

$$V = \frac{1}{2} k_s [Z(t)]^2 + m_a g R (1 - \cos \theta)$$

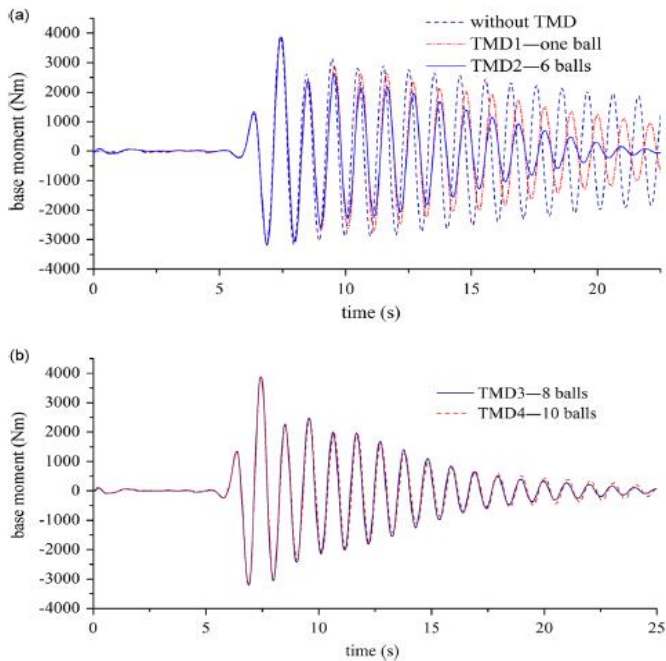
$$\delta W_{nc} = -\dot{Z} c_s \delta Z - \frac{\dot{\theta}}{|\dot{\theta}|} \mu m_a g \cos \theta \frac{R-r}{r} \delta \theta$$

Untuk m_s , c_s , k_s adalah massa, damper, dan kekakuan pegas sistem SDOF (Single Degree of Freedom). Sedangkan, m_a dan k_a adalah massa dan kekakuan dari *Tuned Rolling-ball Damper*. Z adalah perpindahan relatif struktur terhadap bagian dasar, u_g adalah pergerakan daerah dasar, I_a adalah massa momen inersia dari bola baja terhadap sumbunya yang melewati pusatnya. Sedangkan, μ adalah koefisien gesek antara bola baja dan permukaan dalam wadah, R adalah radius dari wadah bola, r adalah radius dari bola baja, dan g adalah percepatan gravitasi.

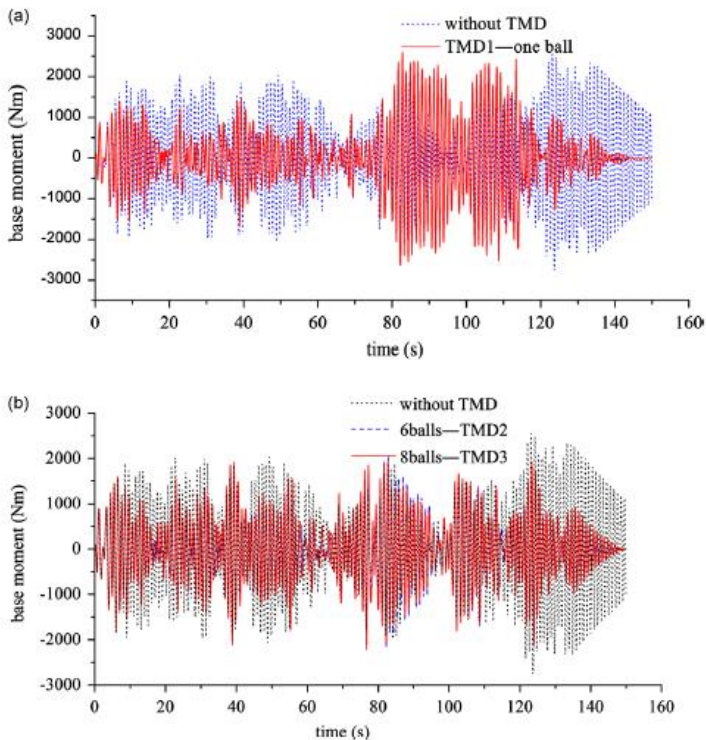
Penelitian ini menghasilkan perbandingan respon sistem saat kondisi tanpa *Rolling-ball* TMD (Tuned Mass Damper) dan menggunakan *Rolling-ball* TMD (Tuned Mass Damper) dengan jumlah 6,8, dan 10 bola baja pejal. Layer dari rumah bola baja pejal tersebut adalah satu dan dua.



Gambar 2. 11(a) Respon dari base moment terhadap waktu tanpa *Rolling-ball* TMD dan penggunaan *Rolling-ball* TMD berjumlah satu dan enam buah bola saat “Overspeed” (b) Respon dari base moment terhadap waktu saat penggunaan *Rolling-ball* TMD berjumlah delapan dan sepuluh buah bola saat “Overspeed”. (Chen & Georgakis, 2013)



Gambar 2. 12(a) Respon dari base moment terhadap waktu tanpa *Rolling-ball* TMD dan penggunaan *Rolling-ball* TMD berjumlah satu dan enam buah bola saat “EOG” (b) Respon dari base moment terhadap waktu saat penggunaan *Rolling-ball* TMD berjumlah delapan dan sepuluh buah bola saat “EOG”. (Chen & Georgakis, 2013)



Gambar 2. 13(a) Respon dari base moment terhadap waktu tanpa *Rolling-ball* TMD dan penggunaan *Rolling-ball* TMD berjumlah satu dan enam buah bola saat “Parking” (b) Respon dari base moment terhadap waktu saat penggunaan *Rolling-ball* TMD berjumlah delapan dan sepuluh buah bola saat “Parking”. (Chen & Georgakis, 2013)

Berdasarkan hasil penelitian tersebut diperoleh bahwa peredam dengan jumlah tiga buah bola pejal dengan satu lapisan lebih baik dalam pengefektifan kontrol daripada peredam yang berjumlah satu. Ketika jumlah bola pejal lebih dari tiga dalam satu lapisan, pengefektifan kontrol dari peredam tidak dapat diperbaiki. Kondisi “overspeed” dan “EOG” tidak dapat menekan

nilai puncak dari respon dinamis, tetapi mengurangi standar deviasinya. Sedangkan untuk “Parking”, ia dapat menekan nilai puncak dan standar deviasinya secara efektif.

2.2 Asal Energi Angin

Pada dasarnya angin terjadi karena ada perbedaan temperatur antara udara panas dan udara dingin. Jika bumi tidak berotasi pada sumbunya, maka udara akan tiba di kutub utara dan kutub selatan, turun ke permukaan lalu kembali ke khatulistiwa. Udara yang bergerak inilah yang merupakan energi yang dapat diperbaharui, yang dapat digunakan untuk memutar turbin dan akhirnya menghasilkan listrik (Bagaskara, 2008)

Syarat-syarat dan kondisi angin yang dapat digunakan untuk menghasilkan energi listrik dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 2. 3 Kondisi Angin

Tabel kondisi angin			
kelas angin	kecepatan angin m/d	kecepatan angin km/jam	Kecepatan angin knot/jam
1	0.3 ~ 1.5	1 ~ 5.4	0.58 ~ 2.92
2	1.6 ~ 3.3	5.5 ~ 11.9	3.11 ~ 6.42
3	3.4 ~ 5.4	12.0 ~ 19.5	6.61 ~ 10.5
4	5.5 ~ 7.9	19.6 ~ 28.5	10.7 ~ 15.4
5	8.0 ~ 10.7	28.6 ~ 38.5	15.6 ~ 20.8
6	10.8 ~ 13.8	38.6 ~ 49.7	21 ~ 26.8
7	13.9 ~ 17.1	49.8 ~ 61.5	2.7 ~ 33.3
8	17.2 ~ 20.7	61.6 ~ 74.5	33.5 ~ 40.3
9	20.8 ~ 24.4	74.6 ~ 87.9	40.5 ~ 47.5
10	24.5 ~ 28.4	88.0 ~ 102.3	47.7 ~ 55.3
11	28.5 ~ 32.6	102.4 ~ 117.0	55.4 ~ 63.4
12	>32.6	>118	63.4

Tabel 2. 4 Tingkat Kecepatan Angin 10m di Atas Permukaan Tanah

Tingkat Kecepatan Angin 10 Meter di Atas Permukaan Tanah		
Kelas Angin	Kecepatan Angin m/d	Kondisi Alam di Dataran
1	0.00 ~ 0.02	-----
2	0.3 ~ 1.5	angin tenang, asap lurus ke atas
3	1.5 ~ 3.3	asap bergerak mengikuti arah angin
4	3.4 ~ 5.4	wajah terasa ada angin, daun2 bergoyang pelan, petunjuk arah angin bergerak
5	5.5 ~ 7.9	debu jalan, kertas beterbangan, ranting pohon bergoyang
6	8.0 ~ 10.7	ranting pohon bergoyang, bendera berkibar
7	10.8 ~ 13.8	ranting pohon besar bergoyang, air berombak kecil
8	13.9 ~ 17.1	ujung pohon melengkung, hembusan angin terasa di telinga
9	17.2 ~ 20.7	dapat mematahkan ranting pohon, jalan berat melawan arah angin
10	20.8 ~ 24.4	dapat mematahkan ranting pohon, rumah rubuh
11	24.5 ~ 28.4	dapat menumbangkan pohon, menimbulkan kerusakan
12	28.5 ~ 32.6	menimbulkan kerusakan parah
13	32.7 ~ 35.9	tornado

Angin kelas 3 adalah batas minimum dan angin kelas 8 adalah batas maksimum energi angin yang dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan energi listrik. (Shabahaini, 2016)

2.2.1 Menghitung Kecepatan Angin Rata-Rata

Angin yang berhembus memiliki kecepatan yang berbeda-beda tiap waktu. Sebelum melakukan perhitungan untuk mengetahui daya yang dihasilkan oleh turbin angin kita harus mengetahui daya yang dihasilkan oleh turbin angin, terlebih dahulu mengetahui kecepatan rata-rata angin. Persamaan kecepatan rata-rata angin adalah (Rachman, 2010):

$$V = \sum_{i=1}^N \frac{V_i}{N}$$

dimana :

V_i = nilai angin sesaat

N = banyaknya pengamatan

V = kecepatan angin rata-rata

2.3 Struktur Turbin Angin

Turbin angin adalah kincir angin yang digerakkan oleh tenaga angin untuk menumbuk biji-bijian serta digunakan untuk membangkitkan tenaga listrik. Turbin angin ini pada awalnya dibuat untuk mengakomodasi kebutuhan para petani dalam melakukan penggilingan padi, keperluan irigasi, dll. Sejak awal dibuat turbin angin yaitu pada tahun 1980, selalu terjadi peningkatan pesat dalam efisiensi, karakteristik, kapasitas, serta desain turbin angin.

Pembangkit Listrik Tenaga Angin (PLTA Angin) membangkitkan listrik dengan bantuan turbin angin yang mana merupakan sebuah sumber berpotensi dan efektif untuk memenuhi kebutuhan listrik di seluruh dunia sekarang ini. Beberapa penelitian Energi angin juga disarankan agar digunakan untuk mengisi daya kendaraan elektrik dan sistem penerangan jalan di Belanda pada tahun 2020 (Bagaskara, 2008).

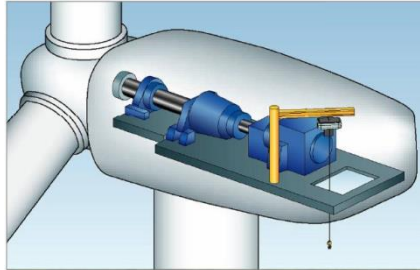
Secara keseluruhan, industri energi angin mencapai kemajuan besar dalam dua dekade terakhir dan hal ini akan memainkan peran penting dalam tujuannya untuk meningkatkan produksi listrik dari sumber energi terbarukan. Angin adalah salah satu bentuk energi yang tersedia di alam, Pembangkit Listrik

Tenaga Angin mengkonversikan energi angin menjadi energi listrik dengan menggunakan turbin angin atau kincir angin (Napitupulu & Napitupulu, 2014). Prinsip kerja pembangkit listrik tenaga angin adalah memanfaatkan energi kinetik dari partikel angin bergerak dengan kecepatan tertentu yang ditangkap oleh turbin angin. Baling-baling yang digunakan berfungsi seperti sayap pesawat udara. Baling-baling turbin dirancang sedemikian rupa sehingga memungkinkan untuk menggerakkan poros rotor generator. Baling-baling memutar poros turbin yang akan menyebabkan rotor pada generator akan bergerak dan generator mengubah energi rotasi menjadi energi listrik. Ketika angin bertiup melalui baling-baling tersebut, maka akan timbul udara bertekanan rendah di bagian bawah dari baling-baling. Tekanan udara yang rendah akan menarik baling-baling bergerak ke area tersebut. Gaya tarik yang ditimbulkan, disebut gaya angkat. Besarnya gaya angkat biasanya lebih kuat dari gaya tarik. Kombinasi antara gaya angkat dan gaya tarik menyebabkan rotor berputar seperti propeler dan memutar generator (Ikhsan & Hipi, 2011).

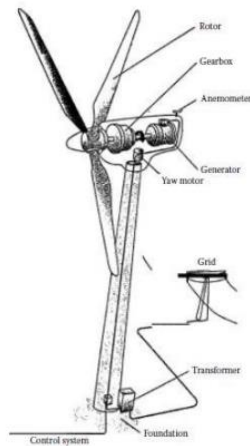
2.3.1 Turbin Angin Sumbu Horizontal

Turbin ini memiliki poros utama dan generator listrik di puncak menara. Sumbu rotasi pada rotor ini paralel terhadap permukaan tanah. Rotor turbin angin kecil diarahkan menuju datangnya angin dengan pengaturan baling-baling angin sederhana sedangkan turbin angin besar umumnya menggunakan sensor angin dan motor yang mengubah rotor turbin mengarah pada angin.

Turbin Angin Sumbu Horizontal (TASH) telah lama diimplementasikan sejak beberapa dekade. Pada Turbin Angin Sumbu Horizontal (TASH), sudu berotasi secara horizontal dan tegak lurus dengan arah angin.



Gambar 2. 14 Gambar *Nacelle* Turbin Angin Sumbu Horizontal



Gambar 2. 15 Turbin Angin Sumbu Horizontal (TASH)
(Napitupulu & Napitupulu, 2014)

TASH dibuat sangat tinggi agar dapat membantu sistem mendapatkan angin yang besar dan kuat untuk membangkitkan daya. Namun, biaya pemasangan dan perawatan dari TASH relatif mahal karena pemasangan bagian-bagian pendukung turbin diletakkan di bagian atas dan tidak begitu dibutuhkan di perkotaan. (Napitupulu & Napitupulu, 2014)

Tower turbin angin berfungsi untuk menopang baling-baling dan nasel. Tower untuk turbin angin yang besar dapat berupa tower tubular steel, lattice tower, atau concrete tower.

Tower tubular guyed hanya digunakan untuk turbin angin kecil (pengisi daya baterai dll).

Kebanyakan turbin angin besar menggunakan jenis tubular steel tower. Berbentuk tabung dan terdiri dari beberapa tingkat dengan panjang 20-30 meter dan di baut disekelilingnya. Tower ini berbentuk kerucut untuk meningkatkan kekuatan dan menghemat material di waktu yang bersamaan. Gambar 2.4 menunjukkan gambar turbin angin dengan tipe tubular steel. (Anon., 2011)

➤ **Konstruksi Turbin Angin Tipe WES 80**



Gambar 2. 16 Turbin Angin Tipe WES 80 (Tubular Steel Tower)
(Anon., 2003)

Spesifikasi umum :

Turbin angin

1. Rancangan sesuai dengan NEN 1010
EN50308
EN6096
ULI741
IIEC61346-2000

2. Sertifikasi : CIWI
3. Kecepatan angin minimal : <3 m/s
4. Kecepatan angin nominal : 13 m/s
5. Kecepatan angin maksimal : 25 m/s
6. Kecepatan angin puncak : 60 m/s
7. Daya nominal : 315 W/m^2
8. Tegangan : $400\text{V} \pm 10\%$
9. Frekuensi : 50/60 Hz
10. Tipe turbin angin : WES 80

Rotor

1. Jumlah sudu : 2
2. Posisi rotor : upwind
3. Diameter : 18 m
4. Kecepatan putar : 60-120 rpm
5. Berat rotor termasuk sudu : 1100 kg

Pengaturan Daya

1. Pasif : penyetelan sudut sudu
2. Aktif : variabel sistem mutator

Gearbox

1. Jumlah tingkat : 2
2. Rasio : 1:20
3. Pengaman rem : ada

Sudu

1. Panjang satu sudu : 7,8 m
2. Berat satu sudu : 100 kg
3. Material : karbon dan serat gelas
4. Dudukan sudu : fleksibel

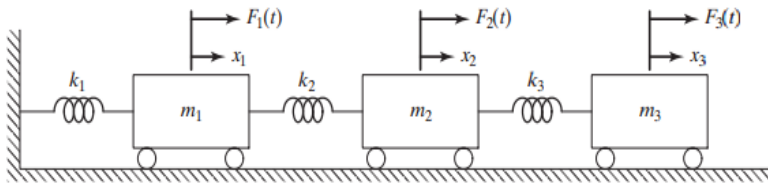
Tower

1. Tipe : tubular
2. Tinggi : 30 m
3. Material : Baja
4. Berat : 7820 kg
5. Berat *nacelle* : 2200 kg (Anon., 2003)

2.4 Sistem Multi Degree of Freedom

2.4.1 Forced Vibration

Getaran mekanik paksa pada sistem derajat kebebasan ganda atau forced multi dof vibration adalah peristiwa getaran yang terjadi pada suatu sistem *multi dof* karena ada gaya eksternal yang mengenai sistem tersebut. Semua benda yang mempunyai massa dan elastisitas mampu bergetar secara alami. Selain getaran alami tersebut, sistem juga dapat menerima getaran paksa yang disebabkan karena adanya gaya eksternal yang mengenai sistem dan dinamakan *forced vibration*. Sistem derajat kebebasan ganda merupakan sistem yang memiliki beberapa komponen massa yang dihubungkan oleh elemen pegas yang masing-masing berjumlah lebih dari dua. Analisa getaran *multi dof* merupakan analisa yang sering digunakan karena fenomena di dunia nyata kebanyakan merupakan sistem dengan *multi dof*. Sistem *forced multi dof vibration* dapat dimodelkan pada gambar 2.16 berikut.



Gambar 2. 17 Skema forced multi dof vibration (Rao, 2011)

Dari gambar 2.16 di atas, maka akan didapatkan matriks dari persamaan gerak dengan menggunakan Hukum Newton kedua yang diberikan untuk setiap massa.

$$m_i \ddot{x}_i + k_i x_i = \sum_i F_i \quad (2.1)$$

Persamaan 2.1 di atas terdiri dari $i=1$, $i=2$ dan $i=3$ sehingga dapat ditulis dalam bentuk matriks:

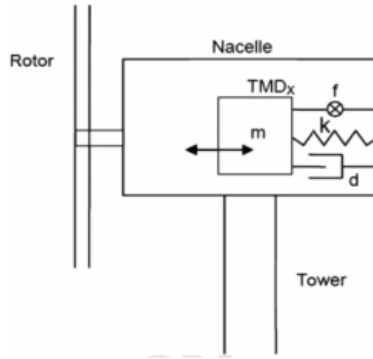
$$[m] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix}, \quad [k] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix},$$

$$[F] = \begin{Bmatrix} F_1(t) \\ F_2(t) \\ F_3(t) \end{Bmatrix} \quad (2.2)$$

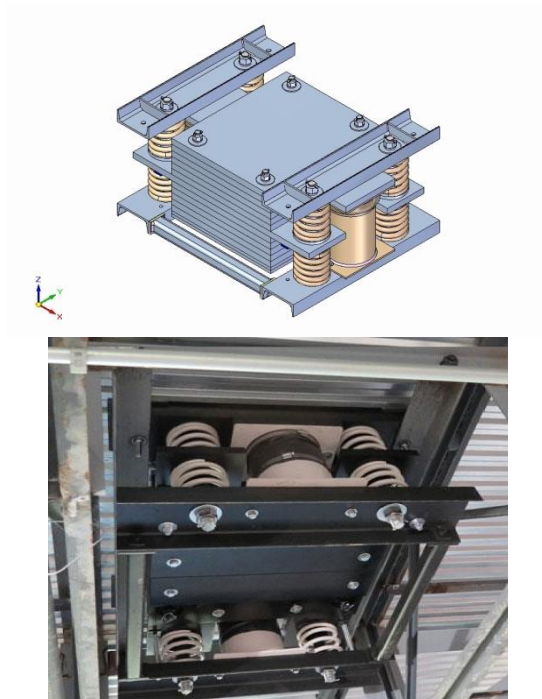
Dengan menyubstitusikan persamaan 2.1 ke persamaan 2.2, maka akan didapatkan:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1(t) \\ F_2(t) \\ F_3(t) \end{Bmatrix} \quad (2.3)$$

2.4.2 Dynamic Vibration Absorber (DVA)



Gambar 2. 18 Kostruksi Tuned mass damper di turbin angin
(Stewart & Lackner, 2014)



Gambar 2. 19 Pemodelan Fisik *Tuned Mass Damper* (TMD) pada Turbin Angin (Deicon, t.thn.)

DVA atau *Tuned Mass Damper* (TMD) atau peredam getaran adalah sebuah alat mekanika yang digunakan untuk mengurangi atau mengeliminasi getaran yang tidak diinginkan. Alat itu terdiri dari massa tambahan serta kekakuan muncul pada massa utama yang akan dilakukan perlindungan terhadap getaran. Karena massa utama dan massa peredam yang diberikan memiliki sistem dua derajat kebebasan (*two-degree-of-freedom system*), maka peredam getaran tersebut akan memiliki dua frekuensi natural. DVA banyak digunakan untuk mesin yang bekerja pada kecepatan konstan, karena DVA terpasang pada satu frekuensi tertentu dan efektif hanya melalui pita sempit dari frekuensi.

2.4.3 Damped Dynamic Vibration Absorber

Damped Dynamic Vibration Absorber terdiri dari massa kedua yang diletakkan pada bagian atas struktur utama (kepala turbin angin) dengan elemen pegas dan peredam. Alat ini menyediakan frekuensi yang bergantung pada karakteristik yang menaikkan redaman pada struktur utama. *Damped Dynamic Vibration Absorber* menghilangkan puncak resonansi asli dalam kurva respon mesin tersebut tetapi menimbulkan dua puncak baru. Karena mesin itu mengalami amplitudo besar saat melalui puncak pertama selama awal operasi dan ketika akan berhenti. Amplitudo daripada mesin dapat dikurangi dengan menambahkan alat peredam getar, seperti terlihat pada gambar 2.17

$$m_1 \ddot{x}_1 + k_1 x_1 + k_2 (x_1 - x_2) + c_2 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) = F_0 \sin \omega t \quad (2.4)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + k_2 (x_2 - x_1) + c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) = 0 \quad (2.5)$$

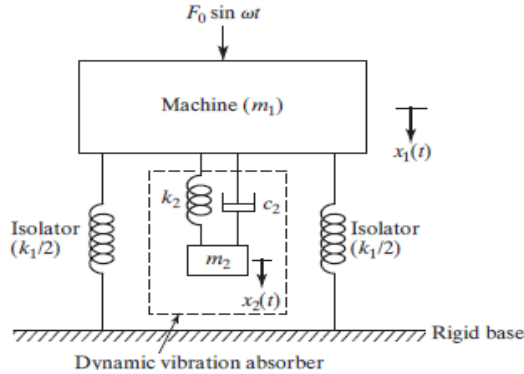
Dengan mengasumsikan penyelesaiannya menjadi

$$x_j(t) = X_j e^{i\omega t}, j = 1, 2. \quad (2.6)$$

Berdasarkan gambar 2.18 di bawah didapatkan persamaan gerak dari massa m_1 dan m_2 adalah sebagai berikut :

$$m_1 \ddot{x}_1 + k_1 x_1 + k_2 (x_1 - x_2) + c_2 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) = F_0 \sin \omega t$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + k_2 (x_2 - x_1) + c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) = 0 \quad (2.7)$$



Gambar 2. 20 Permodelan dinamis sistem utama dengan damped DVA (Rao, 2011)

Penyelesaian *steady-state* dari persamaan (2.4) dan (2.5) dapat disubsitusikan menjadi:

$$X_1 = \frac{F_0(k_2 - m_2\omega^2 + ic_2\omega)}{[(k_1 - m_1\omega^2)(k_2 - m_2\omega^2) - m_2k_2\omega^2] + i\omega c_2(k_1 - m_1\omega^2 - m_2\omega^2)} \quad (2.8)$$

$$X_2 = \frac{X_1(k_2 + i\omega c_2)}{(k_2 - m_2\omega^2 + i\omega c_2)} \quad (2.9)$$

Dimana :

$\mu = m_2/m_1$ = Rasio masa = massa peredam/massa utama

$\delta_{st} = F_0/k_1$ = defleksi statis pada sistem

$\omega_a^2 = k_2/m_2$ = kuadrat dari frekuensi natural peredam

$\omega_n^2 = k_1/m_1$ = kuadrat dari frekuensi natural massa utama

$f = \omega_a/\omega_n$ = rasio dari kedua natural frekuensi

$g = \omega/\omega_n$ = rasio frekuensi

$c_c = 2m_2\omega_n$ = *critical damping* konstan

$\zeta = c_2/c_c$ = rasio peredam

Persamaan (2.9) menunjukkan bahwa amplitudo dari getaran massa utama adalah fungsi dari μ , f , g , dan ζ . Bentuk dari $\left| \frac{X_1}{\delta_{st}} \right|$ melawan gaya rasio frekuensi $g = \omega/\omega_n$ terlihat pada gambar 2.18 untuk $f = 1$ dan $\mu = 1/20$ untuk sedikit perbedaan nilai dari ζ .

$$\frac{X_1}{\delta_{st}} = \left[\frac{(2\zeta g)^2 + (g^2 - f^2)^2}{(2\zeta g)^2 (g^2 - 1 + \mu g^2)^2 + \{\mu f^2 g^2 - (g^2 - 1)(g^2 - f^2)\}^2} \right]^{1/2} \quad (2.10)$$

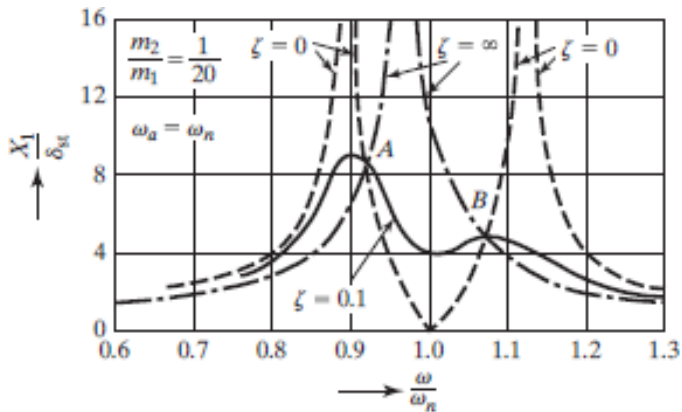
dan

$$\frac{X_2}{\delta_{st}} = \left[\frac{(2\zeta g)^2 + f^4}{(2\zeta g)^2 (g^2 - 1 + \mu g^2)^2 + \{\mu f^2 g^2 - (g^2 - 1)(g^2 - f^2)\}^2} \right]^{1/2} \quad (2.11)$$

Jika redaman adalah bernilai nol ($c_2 = \zeta = 0$), maka resonansi terjadi pada kedua frekuensi resonansi tidak teredam pada sistem. Saat redaman mennjadi tak terhingga ($\zeta = \infty$), kedua massa m_1 and m_2 hampir dijepit bersamaan, dan sistem berperilaku dasarnya sebagai *single-degree-of-freedom* sistem dengan massa $(m_1 + m_2) = (21/20)m$ dan kekakuan dari k_1 . Dalam kasus ini juga, resonansi terjadi dengan $X_1 \rightarrow \infty$ pada

$$g = \frac{\omega}{\omega_n} = \frac{1}{\sqrt{1+\mu}} = 0.9759 \quad (2.12)$$

Respon getaran pada persamaan (2.11) di atas dibentuk ke dalam grafik untuk melihat pengaruhnya terhadap *forced frequency ratio* yang ditunjukkan pada gambar 4 di bawah ini.



Gambar 2. 21 Pengaruh dari *damped dynamic vibration absorber* terhadap respon dari sistem utama (Rao, 2011)

Dari grafik pada gambar 2.19 tentang pengaruh dari *Damped Vibration Absorber* terhadap respon dari sistem utama di atas, dapat dilihat bahwa dengan penambahan *damped DVA* menghasilkan untuk nilai redaman sama dengan nol ($c_2 = \zeta = 0$), resonansi terjadi pada dua *undamped natural frequency*. Sedangkan untuk nilai redaman tidak terhingga ($\zeta = \infty$), kedua massa utama dan massa absorber menjadi sistem *Single DOF*.

2.5 Gaya Aerodinamik

Sudu atau rotor berfungsi untuk menghasilkan putaran akibat gaya angin dan menggerakkan poros turbin dan poros generator yang kemudian akan menghasilkan energi listrik. Bentuk sudu turbin angin menyerupai *airfoil* yang memanjang dari permukaan poros rotor sampai ujung dari sudu tersebut.

Sudu turbin angin diusahakan memiliki kekasaran yang sama pada setiap permukaannya sehingga gaya *lift* nya bisa tinggi. Bagian pangkal sudu dicengkram oleh *hub* dengan menggunakan baut. Pada turbin angin akan terjadi tegangan geser pada permukaannya ketika kontak dengan udara. Distribusi tegangan geser pada permukaan sudu ini dipresentasi dengan

adanya gaya tekan (*drag*) yang arahnya sejajar dengan arah aliran fluida dan gaya angkat (*lift*) yang arahnya tegak lurus dari arah aliran fluida. Secara matematis, kedua gaya ini dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$F_D = \int dF_x = \int p \cos \theta \, dA + \int \tau_w \sin \theta \, dA \quad (2.13)$$

$$F_L = \int dF_y = - \int p \sin \theta \, dA + \int \tau_w \cos \theta \, dA \quad (2.14)$$

Untuk memudahkan perhitungan fenomena *drag* dan *lift*, maka dengan metoda numerik (Gerhart), diperkenalkanlah *drag and lift coefficient* (koefisien gaya tarik dan gaya lift) yang dilambangkan dengan C_D dan C_L . Besarnya C_D dan C_L bergantung dari bentuk melintang sudu yang digunakan dan sudut serang (α). Secara matematis :

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho U^2 A \quad (2.15)$$

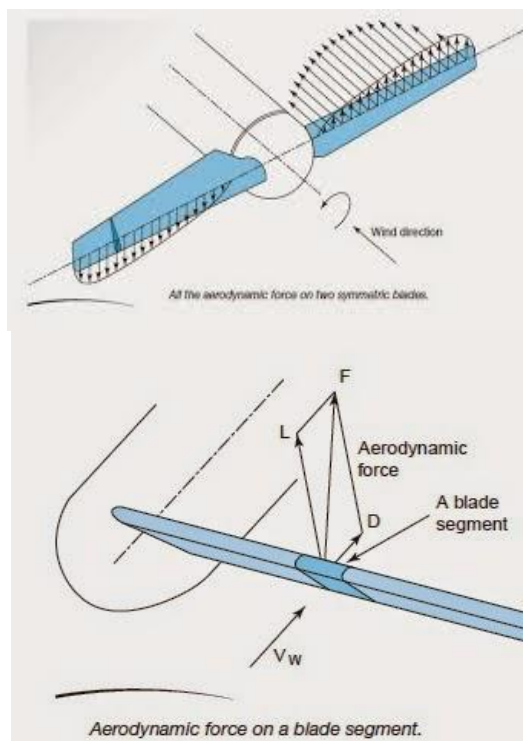
$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho U^2 A \quad (2.16)$$

Dimana

ρ : Densitas Udara ($1,2 \text{ kg/m}^3$)

A : luas penampang baling-baling

U : kecepatan angin



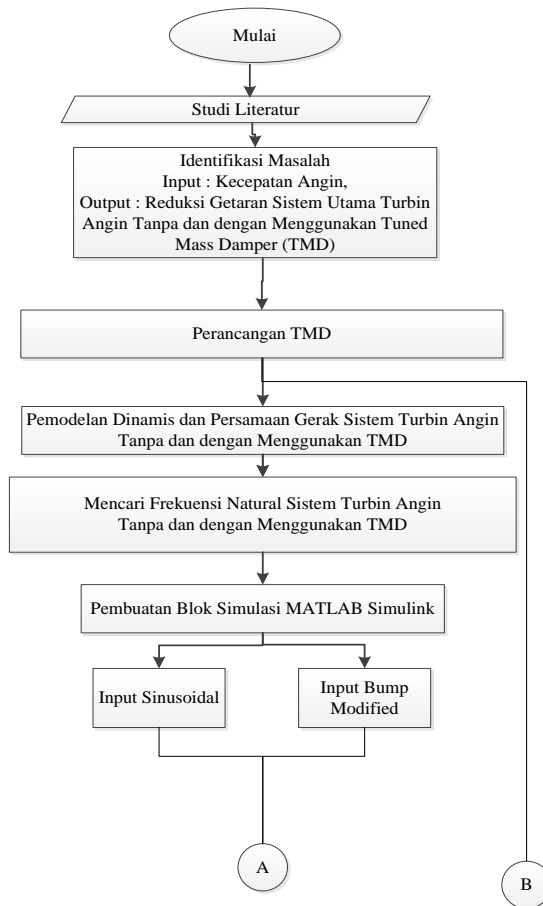
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

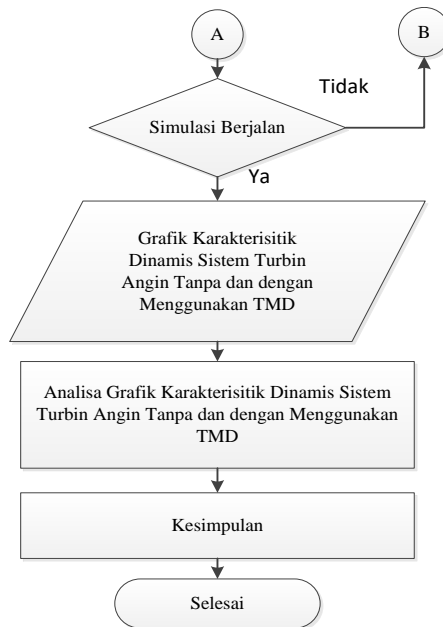
BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Penulisan tugas dilakukan beberapa langkah yang ditunjukkan oleh diagram alir pada gambar 3.1.





Gambar 3. 1 Diagram alir analisa sistem turbin angin tanpa dan dengan menggunakan *Tuned Mass Damper*

Metode pelaksanaan tugas akhir ini secara umum ditunjukkan pada gambar 3.1, dimulai dari studi literatur mengenai sistem (*Dynamic Vibration Absorber*) atau *Tuned Mass Damper* (TMD) di turbin angin. Kemudian mengidentifikasi masalah dari beberapa literatur tersebut dengan menentukan input dan output untuk pelaksanaan tugas akhir ini. Langkah selanjutnya adalah memodelkan bentuk fisik dan matematis untuk sistem utama turbin angin tanpa dan dengan menggunakan *Tuned Mass Damper* (TMD). Lalu mencari frekuensi natural sistem tanpa dan dengan menggunakan TMD yang mana variasi massa TMD adalah 5%-10% dari massa utama turbin angin. Kemudian membuat persamaan gerak serta *state variable* yang kemudian akan dibuat blok diagram pada MATLAB Simulink dengan input sinusoidal dan *bump modified*. Dari simulasi simulink tersebut,

didapatkan grafik karakteristik dinamis sistem turbin angin berupa perpindahan. Setelah itu, menganalisa grafik tersebut dan membuat kesimpulan berdasarkan hasil yang diperoleh. Hasil yang diperoleh berhubungan dengan getaran menara turbin angin yang tereduksi. Setelah itu, menganalisa grafik tersebut dan membuat kesimpulan berdasarkan hasil yang diperoleh.

3.1.1 Tahap Studi Literatur

Dalam penulisan tugas akhir ini dibutuhkan referensi-referensi yang mampu menunjang dalam menganalisis TMD di sistem turbin angin. Oleh karena itu, dilakukan studi literatur untuk menambah wawasan, pengetahuan, dan landasan mengenai permasalahan yang akan dibahas. Referensi untuk studi literatur didapat dari buku, jurnal-jurnal ilmiah, maupun penelitian-penelitian terdahulu yang berkaitan. Adapun materi dari studi literatur yang mendukung dalam penulisan tugas akhir ini yaitu mekanika getaran, pemodelan sistem dinamis, sistem mekanis getaran translasi TMD, analisa turbin angin horizontal serta pembuatan blok diagram pada program MATLAB Simulink. Nilai parameter yang digunakan diperoleh dari jurnal-jurnal ilmiah maupun penelitian terdahulu.

3.1.2 Identifikasi Masalah

Adapun permasalahan yang diangkat pada tugas akhir ini adalah pengaruh respon dinamis (*output*) akibat variasi input yang diberikan ke sistem utama. Parameter input yang ditentukan berupa kecepatan dan frekuensi angin.

3.1.3 Perancangan TMD

Adapun TMD dirancang berupa balok pejal dengan dua buah pegas di kanan dan kiri serta nilai massa peredam sebesar 901.8 kg. Volume balok didapatkan dari persamaan $\rho = \frac{m}{V}$, sehingga volume yang disesuaikan menjadi balok berukuran 0.6x0.4x0.4 m.

3.1.4 Pemodelan Sistem Dinamis dan Penurunan Persamaan Gerak Sistem Turbin Angin Tanpa dan Dengan Menggunakan TMD

Adapun sebelum menambahkan TMD ke dalam sistem utama turbin angin, maka dibutuhkan pemodelan dinamis dan matematis sistem utama yang kemudian akan dicari frekuensi naturalnya. Kemudian frekuensi natural tersebut akan dibandingkan dengan frekuensi kerja angin, saat frekuensi natural sistem sama dengan frekuensi kerja angin, maka sistem turbin angin akan mengalami resonansi. Pada tugas akhir ini dilakukan proses reduksi getaran sistem utama dengan menambahkan TMD atau DVA. DVA yang digunakan adalah DVA yang memiliki 1 gerakan saja, yaitu gerakan arah translasi.

3.1.5 Pembuatan Blok Simulasi MATLAB Simulink

Setelah menemukan pemodelan dinamis beserta persamaan gerak sistem turbin angin, langkah selanjutnya ialah pembuatan blok simulasi yang akan dijalankan pada *software* MATLAB Simulink. Persamaan gerak diubah menjadi masing-masing *state variable*. Kemudian dari *state variable* tersebut diubah menjadi blok diagram. Dengan memasukkan nilai perpindahan sebagai fungsi (x), kecepatan sebagai fungsi (\dot{x}), dan percepatan sebagai fungsi (\ddot{x}), blok diagram dari masing-masing persamaan gerak dihubungkan satu sama lain melalui input sistem.

3.1.6 Simulasi

Setelah itu, proses simulasi dijalankan dengan parameter yang telah ditentukan. Simulasi diberikan variasi input berbeda, yaitu sinusoidal input dan *bump modified input*. Input simulasi berupa sinusoidal karena output yang ingin dihasilkan berasal dari getaran yang harmonik. Input sinusoidal mewakili variasi dari kecepatan angin. Sedangkan, input *bump modified* karena output yang ingin dihasilkan berasal dari variasi kecepatan angin berupa beban yang memberikan *impact* ke sistem.

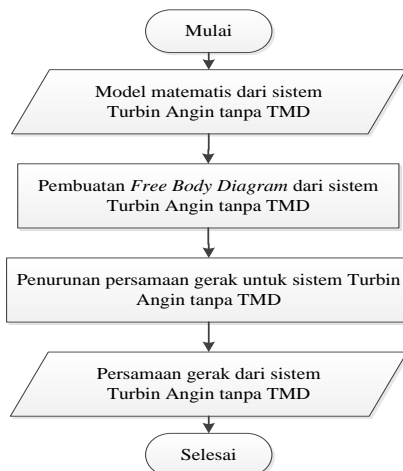
3.1.7 Analisa Grafik dan Karakteristik Dinamis

Dari simulasi sistem turbin angin dengan TMD akan didapatkan grafik respon berupa gaya redam terhadap perpindahan maupun kecepatan angin. Setelah itu, grafik dianalisis kemudian diambil kesimpulan. Penarikan kesimpulan berdasarkan variasi parameter TMD yang memiliki gaya redam terbesar. Gaya redam maksimal menunjukkan bahwa TMD tersebut bekerja optimal dan paling sesuai untuk meredam getaran yang terjadi pada menara turbin angin.

3.2 Pemodelan Sistem Dinamis, Persamaan Gerak, dan Simulasi

3.2.1 Pemodelan Sistem Turbin Angin Tanpa *Tuned Mass Damper*

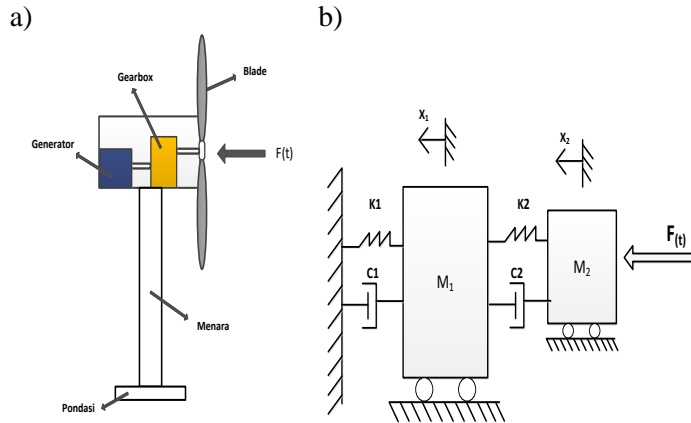
3.2.1.1 Pemodelan Dinamis dan Persamaan Gerak Sistem Turbin Angin Tanpa TMD



Gambar 3. 2 Diagram alir penurunan persamaan gerak dari sistem turbin angin tanpa TMD

Pemodelan yang digunakan pada tugas akhir ini adalah model turbin angin sumbu horizontal dengan 2 derajat kebebasan (2DOF). Masing-masing massa dicari *free body diagram* beserta penurunan persamaan geraknya yang akan dijadikan variabel tetap (*state variable*) yang akan dimasukkan ke dalam blok diagram simulink.

Pada gambar 3.3 menunjukkan bahwa sistem tersebut terdiri dari ekivalensi massa menara dan massa *nacelle* (M_1), dan massa baling-baling (M_2). Pemodelan sistem ini juga disederhanakan dengan menggunakan sumbu horizontal sebagai arah perpindahan. Dimensi dari model fisik diambil berdasarkan tipe turbin angin WES80. Sistem turbin angin ini dimodelkan terkena beban input berupa angin yang mana menyebabkan terjadinya getaran pada sturktur pendukung atau menara. Beban input terbesar terjadi pada bagian kepala turbin atau *nacelle* sehingga menara turbin angin akan mengalami perpindahan sebesar X_1 . Input beban angin akan divariasikan berdasarkan kecepatan dan frekuensi angin tersebut. Pemodelan matematis untuk sistem tanpa TMD ini, seperti terlihat pada gambar 3.3 yang meliputi massa 1 dan 2 masing-masing mengalami perpindahan sebesar X_1 dan X_2 . Konstanta pegas dan peredam dari menara ditunjukkan masing-masing oleh K_1 dan C_1 , sedangkan untuk konstanta pegas dan peredam dari poros yang menghubungkan ke baling-baling ditunjukkan masing-masing oleh K_2 dan C_2 .



Gambar 3. 3(a) Model Fisik Turbin Angin Horizontal dan (b) Model Dinamis Turbin Angin Horizontal Tanpa TMD

Keterangan :

M_1 = Massa ekuivalen menara dan *nacelle* turbin angin (massa utama)

M_2 = Massa baling-baling turbin angin

x_1 = Arah perpindahan massa ekuivalen menara dan *nacelle* turbin angin

x_2 = Arah perpindahan massa baling-baling turbin angin

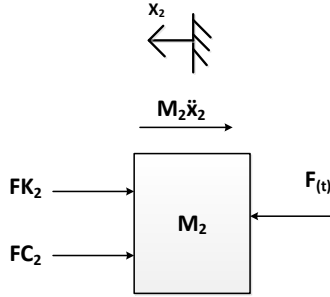
k_1 = Konstanta pegas utama turbin angin

k_2 = Konstanta pegas poros baling-baling turbin angin

c_1 = Konstanta peredam utama turbin angin

c_2 = Konstanta peredam poros baling-baling turbin angin

Tinjau *free body diagram* untuk massa benda 2 (baling-baling turbin angin)



Gambar 3. 4 Model Matematis dan *free body diagram* massa 2 (baling-baling turbin angin)

Persamaan gerak dari benda 2 adalah :

$$\sum F_x - m_2 \ddot{x}_2 = 0$$

$$-m_2 \ddot{x}_2 - Fk_2 - Fc_2 + F(t) = 0 \quad (3.1)$$

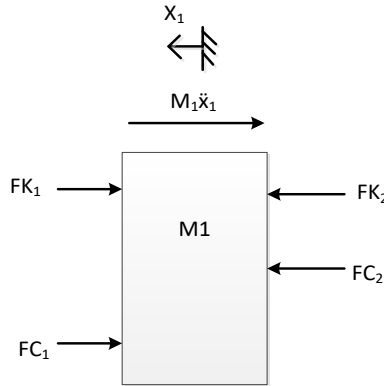
$$m_2 \ddot{x}_2 = F(t) - Fk_2 - Fc_2 \quad (3.2)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 = F(t) - k_2(x_2 - x_1) - c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) \quad (3.3)$$

Persamaan *State Variable*:

$$\begin{aligned} \dot{x}_2 &= v_2 \\ \dot{v}_2 &= \frac{1}{m_2} [F(t) - k_2(x_2 - x_1) - c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1)] \end{aligned} \quad (3.4)$$

Tinjau *free body diagram* untuk massa benda 1 (menara turbin)



Gambar 3. 5 Model Matematis dan *free body diagram* massa 1 (menara turbin angin)

Persamaan gerak dari benda 1 adalah :

$$\sum F_x - m_1 \ddot{x}_1 = 0$$

$$-m_1 \ddot{x}_1 - Fk_1 - Fc_1 + Fk_2 + Fc_2 = 0 \quad (3.5)$$

$$m_1 \ddot{x}_1 = -Fk_1 - Fc_1 + Fk_2 + Fc_2 \quad (3.6)$$

$$m_1 \ddot{x}_1 = k_2(x_2 - x_1) - k_1x_1 - c_1\dot{x}_1 + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) \quad (3.7)$$

State Variable:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= v_1 \\ \dot{v}_1 &= \frac{1}{m_1} [k_2(x_2 - x_1) - k_1x_1 - c_1\dot{x}_1 + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1)] \end{aligned} \quad (3.8)$$

3.2.1.2 Pembuatan Blok Simulasi Sistem Turbin Angin Tanpa TMD

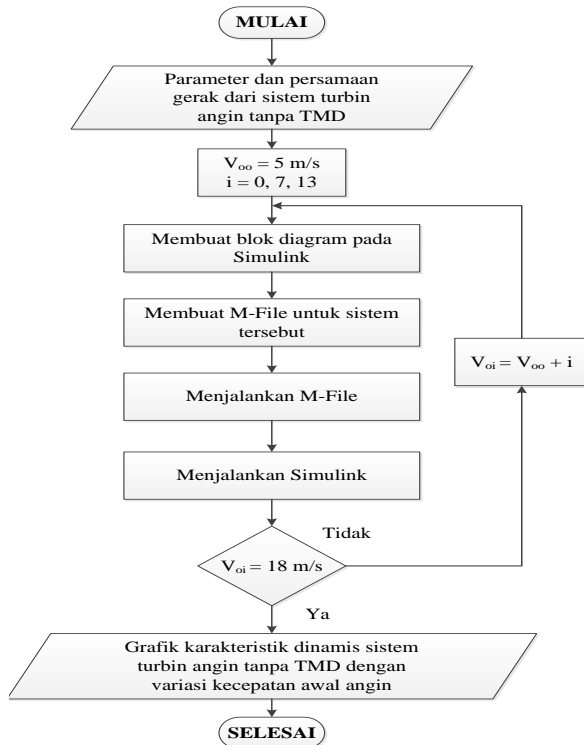
Pembuatan blok simulasi di MATLAB Simulink adalah tahap lanjut dari persamaan gerak dan *state variable* sistem yang telah diperoleh berdasarkan pemodelan fisik dan matematis.

Berikut merupakan parameter yang digunakan untuk membuat simulasi sistem *tuned mass damper* di turbin angin WES80 :

Tabel 3. 1 Parameter sistem utama tanpa TMD

Parameter	Nilai	Keterangan
Konstanta pegas poros	52681 N/m	K_2
Konstanta redaman poros	200 N.s/m	C_2
Massa Blade	1100 kg	M_2
Konstanta pegas menara	1080000 N/m	K_1
Konstanta redaman menara	2000 N.s/m	C_1
Massa menara dan <i>nacelle</i>	10020 kg	M_1
Tinggi menara	30 m	
Diameter menara	1 m	

Setelah menetapkan beberapa parameter, selanjutnya dibuat blok diagram pada simulink kemudian memasukkan input serta nilai parameter tersebut. Input yang digunakan adalah sinusoidal dan *bump modified*. Pada gambar 3.6 akan dijelaskan diagram alir mengenai simulasi dengan MATLAB Simulink. Pada simulasi ini dilakukan variasi terhadap kecepatan kerja angin yaitu sebesar 5 m/s, 12 m/s, dan 18 m/s.



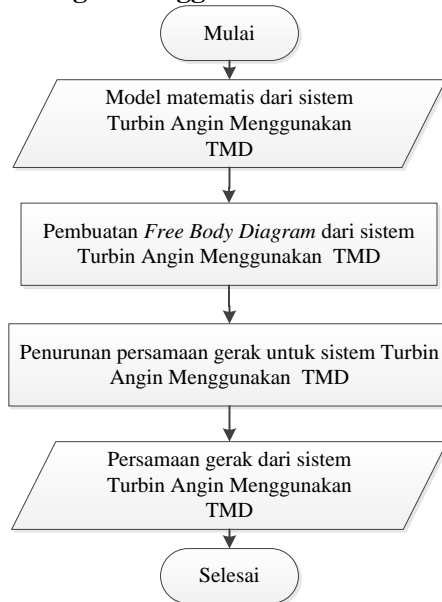
Gambar 3. 6 Diagram alir pembuatan blok diagram Simulink dari sistem turbin angin tanpa TMD dengan variasi kecepatan awal angin (V_{oi}) sebesar 3 m/s.

3.2.1.3 Analisa Grafik Karakteristik Dinamis Sistem Turbin Angin Tanpa TMD

Dari simulasi yang dijalankan untuk sistem turbin angin tanpa TMD, didapatkan grafik karakteristik dinamis berupa perpindahan terhadap frekuensi natural sistem maupun kecepatan angin. Kemudian dilakukan evaluasi dimana letak frekuensi kerja angin yang mengakibatkan resonansi tertinggi terhadap sistem utama. Selanjutnya mengambil kesimpulan dari evaluasi tersebut.

3.2.2 Pemodelan dan Simulasi Sistem Menggunakan TMD

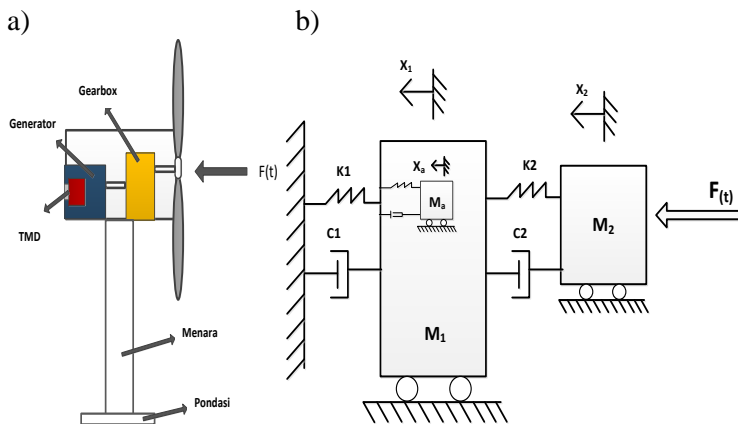
3.2.2.1 Pemodelan Dinamis dan Persamaan Gerak Sistem Turbin Angin Menggunakan TMD



Gambar 3. 7 Diagram alir persamaan gerak dari sistem turbin angin dengan menggunakan TMD

Pemodelan ini menggambarkan pemasangan TMD pada sistem utama turbin angin dan menjelaskan besarnya nilai konstanta pegas dan peredam pada sebuah massa balok yang meredam getaran dengan input berupa variasi kecepatan dan frekuensi angin. Pemodelan sistem ini juga disederhanakan dengan menggunakan sumbu horizontal sebagai arah perpindahan. Saat menara turbin angin dalam kondisi diam maka *Tuned Mass Damper* akan berada di tengah *nacelle*. Sedangkan, saat menara turbin angin terkena beban input, maka menara mengalami perpindahan sebesar X_1 yang secara otomatis menggerakkan massa absorber sebesar X_a . Konstanta pegas dan

peredam dari massa TMD atau absorber ditunjukkan masing-masing oleh K_a dan C_a . Setelah membuat pemodelan dinamis pada sistem utama menggunakan TMD, kemudian lanjut ke pemodelan matematis serta penurunan persamaan gerak masing-masing massa. Sistem dari pemodelan ini memiliki 3 derajat kebebasan (3DOF). Masing-masing massa dicari *free body diagram* beserta penurunan persamaan geraknya yang akan dijadikan variabel tetap (*state variable*) untuk dimasukkan ke dalam blok diagram simulink.



Gambar 3. 8(a) Model Fisik Turbin Angin Horizontal dan
(b) Model Dinamis Turbin Angin Horizontal dengan
Menggunakan TMD

Keterangan :

M_1 = Massa ekuivalen menara dan *nacelle* turbin angin
(massa utama)

M_2 = Massa baling-baling turbin angin

M_a = Massa Absorber

x_a = Arah perpindahan massa absorber

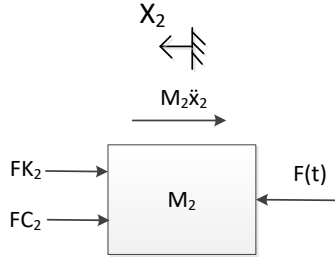
x_1 = Arah perpindahan massa utama turbin angin

x_2 = Arah perpindahan massa baling-baling turbin angin

k_1 = Konstanta pegas utama turbin angin

- k_2 = Konstanta pegas poros baling-baling turbin angin
 c_1 = Konstanta peredam utama turbin angin
 c_2 = Konstanta peredam poros baling-baling turbin angin

Tinjau *free body diagram* untuk massa benda 2 (baling-baling turbin angin)



Gambar 3. 9 Model Matematis dan *free body diagram* massa 2 (baling-baling turbin angin)

Persamaan gerak dari benda 2 adalah :

$$\sum F_x - m_2 \ddot{x}_2 = 0$$

$$-m_2 \ddot{x}_2 - Fk_2 - Fc_2 = 0 \quad (3.9)$$

$$Fk_2 + Fc_2 + m_2 \ddot{x}_2 - F(t) = 0 \quad (3.10)$$

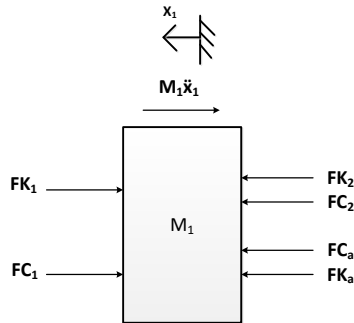
$$m_2 \ddot{x}_2 = F(t) - Fk_2 - Fc_2 \quad (3.11)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 = F(t) - k_2(x_2 - x_1) - c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) \quad (3.12)$$

Persamaan *State Variable*:

$$\begin{aligned} \dot{x}_2 &= v_2 \\ \dot{v}_2 &= \frac{1}{m_2} [F(t) - k_2(x_2 - x_1) - c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1)] \end{aligned} \quad (3.13)$$

Tinjau *free body diagram* untuk massa benda 1 (menara turbin)



Gambar 3. 10 Model Matematis dan *free body diagram* massa 1 (menara turbin angin)

Persamaan gerak dari benda 1 adalah :

$$\sum F_x - m_1 \ddot{x}_1 = 0$$

$$-m_1 \ddot{x}_1 - Fk_1 - Fc_1 + Fk_2 + Fk_a + Fc_2 + Fc_a = 0 \quad (3.14)$$

$$m_1 \ddot{x}_1 = -Fk_1 - Fc_1 + Fk_2 + Fk_a + Fc_2 + Fc_a \quad (3.15)$$

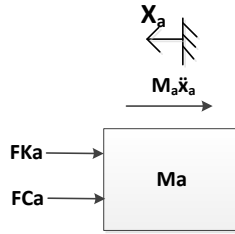
$$m_1 \ddot{x}_1 = c_a(\dot{x}_1 - \dot{x}_a) + k_a(x_1 - x_a) + k_2(x_2 - x_1) - k_1x_1 - c_1\dot{x}_1 + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) \quad (3.16)$$

State Variable:

$$\dot{x}_1 = v_1$$

$$\dot{v}_1 = \frac{1}{m_1} [c_a(\dot{x}_1 - \dot{x}_a) + k_a(x_1 - x_a) + k_2(x_2 - x_1) - k_1x_1 - c_1\dot{x}_1 + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1)] \quad (3.17)$$

Tinjau *free body diagram* untuk massa benda a atau *Tuned Mass Damper*



Gambar 3. 11 Model Matematis dan *free body diagram* massa a (massa absorber)

Persamaan gerak dari benda a adalah :

$$\sum F_x - m_a \ddot{x}_a = 0$$

$$-m_a \ddot{x}_a - Fk_a - Fc_a = 0 \quad (3.18)$$

$$m_a \ddot{x}_a = -Fk_a - Fc_a \quad (3.19)$$

$$m_a \ddot{x}_a = -k_a(x_1 - x_a) - c_a(\dot{x}_1 - \dot{x}_a) \quad (3.20)$$

3.2.2.2 Pembuatan Blok Simulasi Sistem Turbin Angin Menggunakan TMD

Pembuatan blok simulasi di MATLAB Simulink adalah tahap lanjut dari persamaan gerak dan *state variable* sistem yang telah diperoleh berdasarkan pemodelan fisik dan matematis. Berikut merupakan parameter yang digunakan untuk membuat simulasi sistem turbin angin dengan menambahkan *tuned mass damper* di turbin angin WES80 :

Tabel 3. 2 Parameter sistem utama dengan tuned mass damper

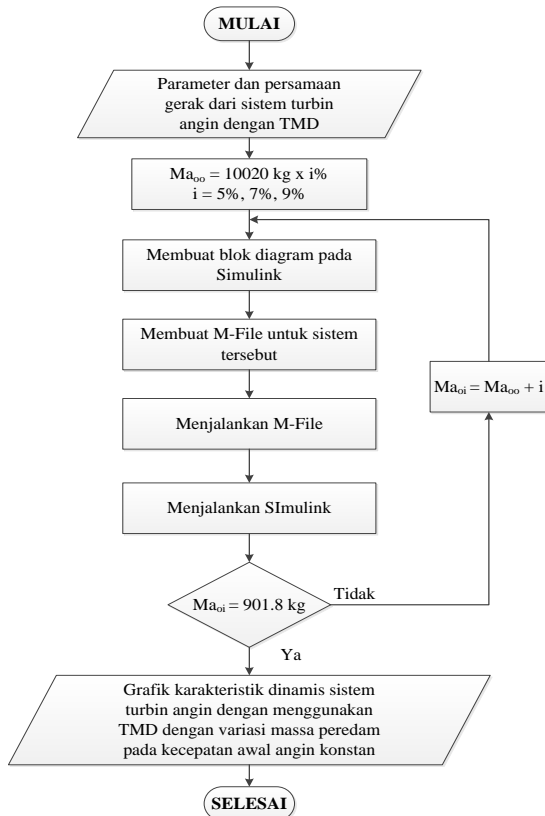
Parameter	Nilai	Keterangan
Massa Blade	100 kg	M ₂
Konstanta pegas poros	52681 N/m	K2
Konstanta peredam poros	200 N.s/m	C2
Massa menara dan <i>nacelle</i> (utama)	10020 kg	M1

Konstanta pegas menara	1080000 N/m	K_1
Konstanta peredam menara	2000 N.s/m	C_1
Massa TMD	5, 7, dan 9% massa utama	M_a
Konstanta pegas TMD	5, 7, dan 9% massa utama	K_a
Konstanta peredam TMD	5, 7, dan 9% massa utama	C_a
Tinggi menara	30 m	
Diameter menara	1 m	

Proses pembuatan blok diagram pada Simulink dijelaskan berupa diagram alir pada gambar 3.11. Parameter TMD ditentukan berdasarkan buku “Mekanika Getaran” oleh Singiresu S. Rao dan parameter lainnya didapat berdasarkan jurnal eksperimen dan penelitian terdahulu. Setelah mendapatkan nilai parameter yang dibutuhkan untuk simulasi, input yang diberikan untuk simulasi ini berupa *sinusoidal input* dan *bump modified input*.

Pada simulasi ini, dilakukan variasi terhadap massa peredam dimana akan dicari nilai optimal agar mampu meredam pada masing-masing kecepatan kerja angin (5 m/s, 12 m/s, dan 18 m/s).

- Variasi massa peredam (M_a) dengan kecepatan awal angin (V_o) konstan pada luasan baling-baling sebesar 254,34 m². Variasi massa peredam dilakukan berulang pada saat kecepatan sebesar 5 m/s, 12 m/s, dan 18 m/s.



Gambar 3. 12 diagram alir pembuatan blok diagram Simulink sistem utama dengan penambahan *Tuned Mass Damper* dengan variasi massa peredam (Ma) dengan kecepatan awal angin (V_0) konstan yaitu sebesar 5 m/s.

3.2.3 Analisis Grafik Sistem Turbin Angin Menggunakan TMD

Dari simulasi sistem turbin angin menggunakan *tuned mass damper* akan didapatkan respon dinamis berupa perpindahan,

amplitudo, dan kecepatan dari input sinusoidal maupun *bump modified*.

Grafik-grafik tersebut dianalisis berdasarkan sistem dengan DVA atau TMD dan tanpa TMD. Harapan dari analisa grafik ialah sistem turbin angin dengan penambahan TMD dapat secara efisien mengurangi getaran akibat beban angin yang berfluktuasi pada menara turbin sehingga dapat mengurangi resiko terjadinya resonansi yang akan perlahan merusak komponen-komponen tertentu pada sistem turbin angin. Selanjutnya dilakukan evaluasi dan mengambil kesimpulan dari hasil analisis dan evaluasi yang telah dilakukan.

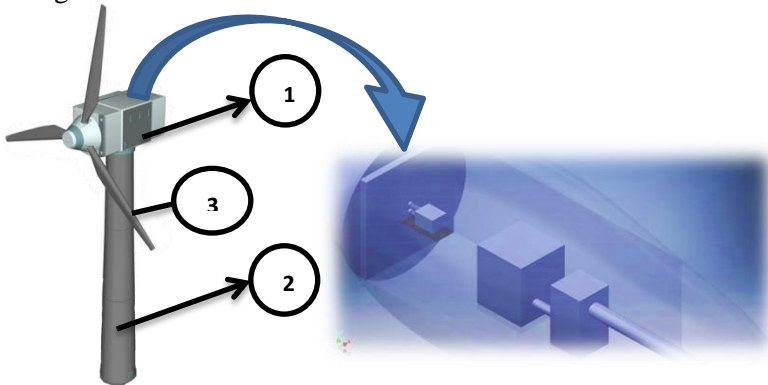
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB IV

HASIL ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1 Pemodelan Sistem Turbin Angin

Tugas akhir ini telah dilakukan pemodelan sistem utama sebagai turbin angin yang terdiri dari massa menara (utama) dan massa sudu turbin. Mekanisme dari turbin angin ini adalah sebagai berikut.



Gambar 4. 1 Rancangan Mekanisme Sistem Turbin Angin sebagai Sistem Utama

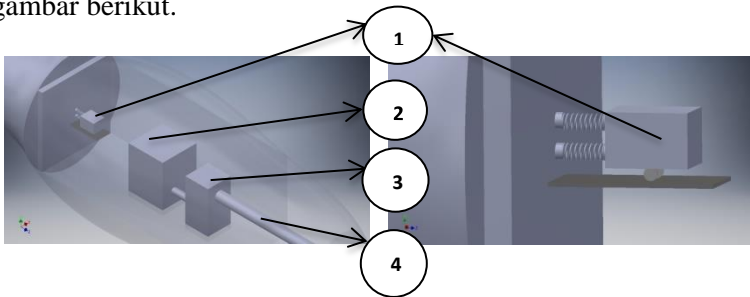
Keterangan gambar :

- | | |
|------------------------|----------------------|
| 1. <i>Nacelle</i> | 3. Sudu Turbin Angin |
| 2. Menara Turbin Angin | |

4.2 Perancangan Mekanisme Sistem TMD

Tugas akhir ini juga dilakukan perancangan sistem peredam *Tuned Mass Damper* (TMD) yang digunakan untuk mereduksi getaran dari sistem utama agar gerakan struktur terbatas karena terkena eksitasi khusus. Mekanisme dari rancangan TMD melibatkan massa peredam (Ma), kekakuan

(K_a), dan koefisien peredam (C_a) seperti yang dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 4. 2 Rancangan Penambahan *Tuned Mass Damper* pada Bagian *Nacelle* Turbin Angin

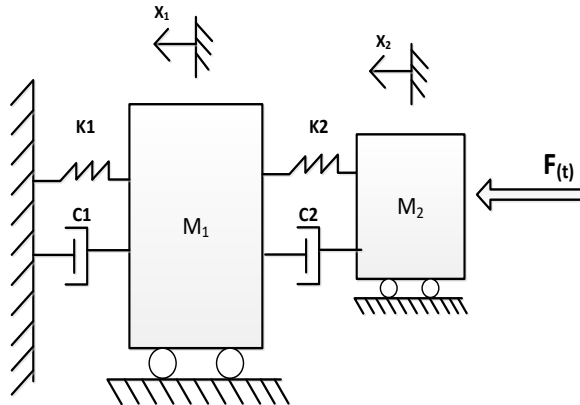
Keterangan gambar :

1. *Tuned Mass Damper* (TMD)
2. *Gearbox*
3. Generator
4. Poros

4.3 Pemodelan Sistem Turbin Angin dan TMD

4.3.1 Sistem turbin angin tanpa TMD

Dalam tugas akhir ini, sistem turbin angin memiliki sistem *Dual DOF* dengan arah translasi. Respon sistem diwakilkan dengan melalui respon percepatan sistem. Sistem turbin angin terkena gaya eksitasi berupa kecepatan angin yang kemudian dikonversikan menjadi gaya angkat dan gaya *drag*, sehingga terjadi getaran harmonik pada sistem turbin angin. Pemodelan sistem turbin angin tanpa TMD digunakan sebagai pembanding pada sistem dengan penambahan TMD. Analisa sistem tersebut dilakukan dengan perhitungan matematis dan simulasi menggunakan *software* Matlab Simulink.



Gambar 4. 3 Model Dinamis Sistem Turbin Angin

Gambar 4.3 Di atas ini merupakan gambar model dinamis dan *free body diagram* dari massa sistem turbin angin tanpa penambahan TMD. Model dinamis menentukan arah gerak vektor gaya yang bekerja pada sistem turbin angin. Dari gambar dapat dilihat gaya-gaya yang bekerja pada massa utama (M_1). Tugas akhir kali ini membatasi arah gerak sistem tersebut yaitu hanya pergerakan arah translasi.

Keterangan :

M_1 = Massa ekuivalen menara dan *nacelle* turbin angin (massa utama)

M_2 = Massa baling-baling turbin angin

x_1 = Arah perpindahan massa ekuivalen menara dan *nacelle* turbin angin

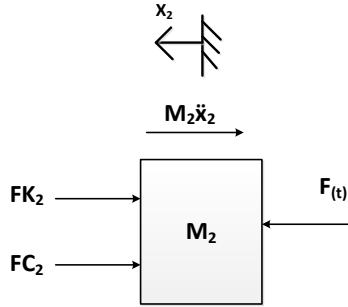
x_2 = Arah perpindahan massa baling-baling turbin angin

k_1 = Konstanta pegas utama turbin angin

k_2 = Konstanta pegas poros baling-baling turbin angin

c_1 = Konstanta peredam utama turbin angin

c_2 = Konstanta peredam poros baling-baling turbin angin



Gambar 4. 4 Model Matematis dan *free body diagram* massa 2 (baling-baling turbin angin)

Persamaan gerak dari benda 2 adalah :

$$\sum F_x - m_2 \ddot{x}_2 = 0$$

$$-m_2 \ddot{x}_2 - Fk_2 - Fc_2 + F(t) = 0 \quad (4.1)$$

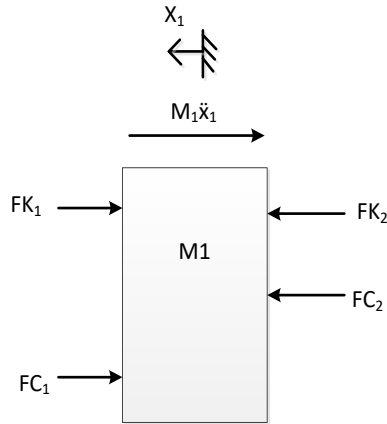
$$m_2 \ddot{x}_2 = F(t) - Fk_2 - Fc_2 \quad (4.2)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 = F(t) - k_2(x_2 - x_1) - c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) \quad (4.3)$$

Persamaan *State Variable*:

$$\begin{aligned} \dot{x}_2 &= v_2 \\ \dot{v}_2 &= \frac{1}{m_2} [F(t) - k_2(x_2 - x_1) - c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1)] \end{aligned} \quad (4.4)$$

Tinjau *free body diagram* untuk massa benda 1 (menara turbin)



Gambar 4. 5 Model Matematis dan *free body diagram* massa 1 (menara turbin angin)

Persamaan gerak dari benda 1 adalah :

$$\sum F_x - m_1 \ddot{x}_1 = 0$$

$$-m_1 \ddot{x}_1 - Fk_1 - Fc_1 + Fk_2 + Fc_2 = 0 \quad (4.5)$$

$$m_1 \ddot{x}_1 = -Fk_1 - Fc_1 + Fk_2 + Fc_2 \quad (4.6)$$

$$m_1 \ddot{x}_1 = k_2(x_2 - x_1) - k_1 x_1 - c_1 \dot{x}_1 + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) \quad (4.7)$$

State Variable:

$$\dot{x}_1 = v_1$$

$$\dot{v}_1 = \frac{1}{m_1} [k_2(x_2 - x_1) - k_1 x_1 - c_1 \dot{x}_1 + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1)] \quad (4.8)$$

Analisa matematis dilakukan untuk mendapatkan nilai frekuensi natural pada sistem turbin angin tanpa penambahan TMD. Frekuensi natural tersebut dibandingkan dengan frekuensi natural baru saat sistem turbin angin dengan penambahan TMD. Nilai dari frekuensi natural sistem didapatkan berdasarkan analisa fundamental sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} M_2 & 0 \\ 0 & M_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_1 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_2 & -C_2 \\ -C_2 & C_2 + C_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_2 \\ \dot{x}_1 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_2 & -K_2 \\ -K_2 & K_2 + K_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_2 \\ x_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F(t) \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Dalam perhitungan nilai frekuensi natural, digunakan beberapa asumsi, yaitu nilai redaman beserta gaya eksitasi diabaikan. Dimana parameter yang digunakan dalam simulasi terlampir pada tabel 3.1. Untuk nilai \ddot{x} diubah dengan mensubstitusikan $\ddot{x} = -\lambda x$ dan $\lambda = \omega^2$, sehingga persamaan di atas menjadi :

$$\begin{aligned} -\omega^2 \begin{bmatrix} M_2 & 0 \\ 0 & M_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 + k_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_2 \\ x_1 \end{Bmatrix} &= \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \\ \begin{bmatrix} -M_2\omega^2 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & -M_1\omega^2 + k_2 + k_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_2 \\ X_1 \end{Bmatrix} &= \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \end{aligned}$$

Dengan memasukkan parameter, matriks di atas dianalisa fundamental untuk menghitung frekuensi natural dari sistem turbin angin tanpa penambahan TMD. Berikut perhitungan tersebut.

$$\begin{aligned} -\omega^2 \begin{bmatrix} 110 & 0 \\ 0 & 10020 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 52681 & -52681 \\ -52681 & 52681 + 1080000 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_2 \\ x_1 \end{Bmatrix} &= \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \\ \begin{bmatrix} -110\omega^2 + 52681 & -52681 \\ -52681 & -10020\omega^2 + 52681 + 10020 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_2 \\ x_1 \end{Bmatrix} &= \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \end{aligned}$$

Karena $\lambda = \omega^2$, maka :

$$\det \begin{bmatrix} -110\lambda + 52681 & -52681 \\ -52681 & -10020\lambda + 62701 \end{bmatrix} = 0$$

$$[(-110\lambda + 52681)(-10020\lambda + 62701)] - [(-52681)(-52681)] = 0$$

$$1102200\lambda^2 - 527863620\lambda - 6897110\lambda + 3303151381 - 2775287761 = 0$$

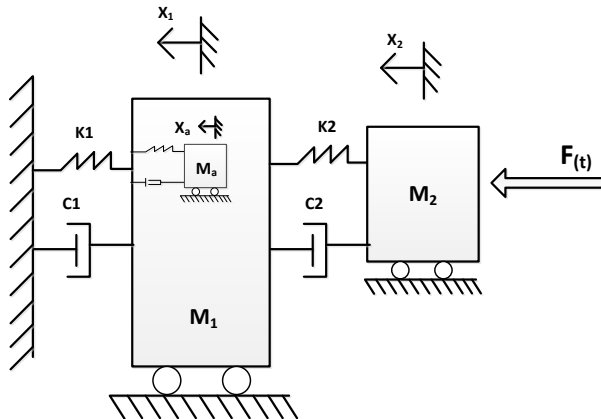
$$1102200\lambda^2 - 534760730\lambda + 527863620 = 0$$

Sehingga didapatkan nilai λ_1, λ_2 dan frekuensi natural adalah :

$$\begin{array}{ll} \lambda_1 = 113.042 & \rightarrow \omega_{n1} = 10.803 \\ \lambda_2 = 47.892 & \rightarrow \omega_{n2} = 6.65 \end{array}$$

4.3.2 Sistem turbin angin dengan menggunakan TMD

Tugas akhir kali ini memodelkan sistem turbin angin dengan menambahkan TMD pada bagian massa utama atau massa menara turbin angin, model fisik di bawah dianalisa *free body diagram* seperti yang ditunjukkan pada gambar.



Gambar 4. 6 Pemodelan Fisik dari Sistem Turbin Angin dengan Penambahan TMD

Keterangan :

M_1 = Massa ekivalen menara dan *nacelle* turbin angin (massa utama)

M_2 = Massa baling-baling turbin angin

M_a = Massa Absorber

x_a = Arah perpindahan massa absorber

x_1 = Arah perpindahan massa utama turbin angin

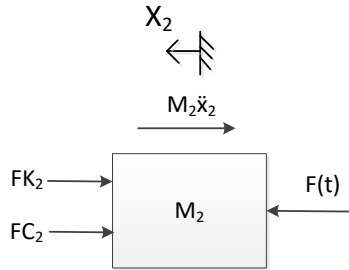
x_2 = Arah perpindahan massa baling-baling turbin angin

k_1 = Konstanta pegas utama turbin angin

- k_2 = Konstanta pegas poros baling-baling turbin angin
 c_1 = Konstanta peredam utama turbin angin
 c_2 = Konstanta peredam poros baling-baling turbin angin

Model sistem di atas memiliki sistem 3 DOF karena ada penambahan massa peredam. Massa peredam bergerak arah translasi melawan arah gerak translasi massa utama agar membuat gerak massa utama terbatas sehingga getaran sistem dapat teredam.

Tinjau *free body diagram* untuk massa benda 2 (baling-baling turbin angin)



Gambar 4. 7 Model Matematis dan *free body diagram* massa 2 (baling-baling turbin angin)

Persamaan gerak dari benda 2 adalah :

$$\sum F_x - m_2 \ddot{x}_2 = 0$$

$$-m_2 \ddot{x}_2 - Fk_2 - Fc_2 = 0 \quad (4.9)$$

$$Fk_2 + Fc_2 + m_2 \ddot{x}_2 - F(t) = 0 \quad (4.10)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 = F(t) - Fk_2 - Fc_2 \quad (4.11)$$

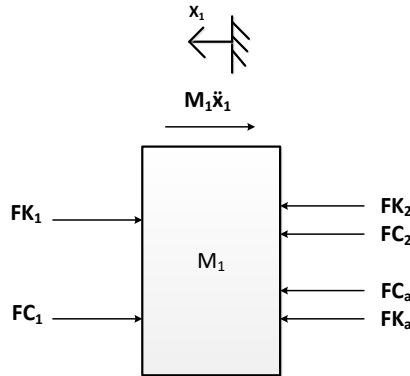
$$m_2 \ddot{x}_2 = F(t) - k_2(x_2 - x_1) - c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) \quad (4.12)$$

Persamaan *State Variable*:

$$\dot{x}_2 = v_2$$

$$\dot{v}_2 = \frac{1}{m_2} [F(t) - k_2(x_2 - x_1) - c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1)] \quad (4.13)$$

Tinjau *free body diagram* untuk massa benda 1 (menara turbin)



Gambar 4. 8 Model Matematis dan *free body diagram* massa 1 (menara turbin angin)

Persamaan gerak dari benda 1 adalah :

$$\sum F_x - m_1 \ddot{x}_1 = 0$$

$$-m_1 \ddot{x}_1 - Fk_1 - Fc_1 + Fk_2 + Fk_a + Fc_2 + Fc_a = 0 \quad (4.14)$$

$$m_1 \ddot{x}_1 = -Fk_1 - Fc_1 + Fk_2 + Fk_a + Fc_2 + Fc_a \quad (4.15)$$

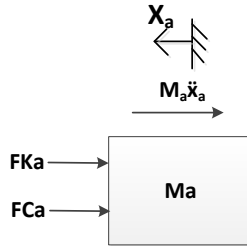
$$m_1 \ddot{x}_1 = c_a(\dot{x}_1 - \dot{x}_a) + k_a(x_1 - x_a) + k_2(x_2 - x_1) - k_1x_1 - c_1\dot{x}_1 + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) \quad (4.16)$$

State Variable:

$$\dot{x}_1 = v_1$$

$$\dot{v}_1 = \frac{1}{m_1} [-c_a(\dot{x}_1 - \dot{x}_a) - k_a(x_1 - x_a) + k_2(x_2 - x_1) - k_1x_1 - c_1\dot{x}_1 + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1)] \quad (4.17)$$

Tinjau *free body diagram* untuk massa benda a atau *Tuned Mass Damper*



Gambar 4. 9 Model Matematis dan *free body diagram* massa a (massa absorber)

Persamaan gerak dari benda a adalah :

$$\sum F_x - m_a \ddot{x}_a = 0$$

$$-m_a \ddot{x}_a - Fk_a - Fc_a = 0 \quad (4.18)$$

$$m_a \ddot{x}_a = -Fk_a - Fc_a \quad (4.19)$$

$$m_a \ddot{x}_a = -k_a(x_1 - x_a) - c_a(\dot{x}_1 - \dot{x}_a) \quad (4.20)$$

Persamaan *State Variable*:

$$\begin{aligned} \dot{x}_a &= v_a \\ \dot{v}_a &= \frac{1}{m_a} [-k_a(x_a - x_1) - c_a(\dot{x}_a - \dot{x}_1)] \end{aligned} \quad (4.21)$$

Setelah menjabarkan persamaan gerak, dilakukan analisa fundamental untuk mencari nilai frekuensi natural baru dengan sistem turbin angin penambahan TMD. Hal ini bertujuan untuk membandingkan nilai frekuensi natural lama dan baru sehingga didapatkan keefektifan penambahan TMD dari nilai reduksi getaran yang terjadi. TMD. Nilai dari frekuensi natural sistem didapatkan berdasarkan analisa fundamental sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} M_1 & 0 & 0 \\ 0 & M_2 & 0 \\ 0 & 0 & M_a \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_a \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_2 & -C_2 & 0 \\ -C_2 & C_2 + C_1 + C_a & -C_a \\ 0 & -C_a & C_a \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_a \end{Bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_1 + k_a & -k_a \\ 0 & -k_a & k_a \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_a \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F(t) \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Dalam perhitungan nilai frekuensi natural, digunakan beberapa asumsi, yaitu nilai redaman beserta gaya eksitasi diabaikan. Dimana parameter yang digunakan dalam simulasi terlampir pada tabel 3.2. Untuk nilai \ddot{x} diubah dengan mensubstitusikan $\ddot{x} = -\lambda x$ dan $\lambda = \omega^2$, sehingga persamaan di atas menjadi :

$$\begin{aligned} -\omega^2 \begin{bmatrix} M_1 & 0 & 0 \\ 0 & M_2 & 0 \\ 0 & 0 & M_a \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_a \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_1 + k_a & -k_a \\ 0 & -k_a & k_a \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_a \end{Bmatrix} \\ = \begin{Bmatrix} F(t) \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} -M_1\omega^2 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & -M_2\omega^2 + k_2 + k_1 + k_a & -k_a \\ 0 & -k_a & -M_a\omega^2 + k_a \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_1 \\ X_1 \\ X_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Karena $\lambda = \omega^2$, maka :

$$\begin{aligned} \det \begin{bmatrix} -M_1\lambda + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & -M_2\lambda + k_2 + k_1 + k_a & -k_a \\ 0 & -k_a & -M_a\lambda + k_a \end{bmatrix} &= 0 \\ [(k_1 - \lambda M_1)(k_1 + k_2 + k_a - \lambda M_2)(k_a - \lambda M_a)] - \\ [-k_a^2(k_1 - \lambda M_1)] - [-k_1^2(k_3 - \lambda M_a)] &= 0 \end{aligned}$$

Sehingga didapatkan nilai frekuensi natural baru setelah penambahan TMD dengan variasi massa peredam 5%, 12%, dan 18%, konstanta pegas (Ka) dan konstanta peredam (Ca). Nilai frekuensi natural tersebut terlampir pada tabel 4.1 sebagai berikut.

Tabel 4. 1 Frekuensi Natural Sistem Turbin Angin dengan Menggunakan TMD Variasi Nilai Ka dan Ca

Massa TMD	Variasi (Ka dan Ca)	Frekuensi natural sistem utama tanpa TMD		ω_n1	ω_n2	ω_n3
		ω_n1	ω_n2			
5% M1	50200.25 dan 1344.023	6.65	10.8	6.637	10.0083	12.783
	69999.79 dan 1877.872			6.638	10.0084	12.783
	88135.62 dan 2389.272			6.6391	10.2268	14.035
7% M1	50200.25 dan 1344.023			6.6173	8.1313	11.296
	69999.79 dan 1877.872			6.6282	9.145	11.833
	88135.62 dan 2389.272			6.6315	9.654	12.571
9% M1	50200.25 dan 1344.023			6.6119	8.307	11.525
	69999.79 dan 1877.872			6.6119	8.307	11.525
	88135.62 dan 2389.272			6.6207	8.9609	11.972

4.4 Diagram Blok

Dari persamaan gerak yang didapat, selanjutnya dibuat diagram blok sesuai dengan persamaan gerak dari masing-masing sistem. Dan dari diagram blok tersebut akan didapatkan grafik respon dari masing-masing sistem. Parameter dalam simulasi telah dilampirkan pada tabel 3.1 dan 3.2.

4.4.1 Input yang digunakan

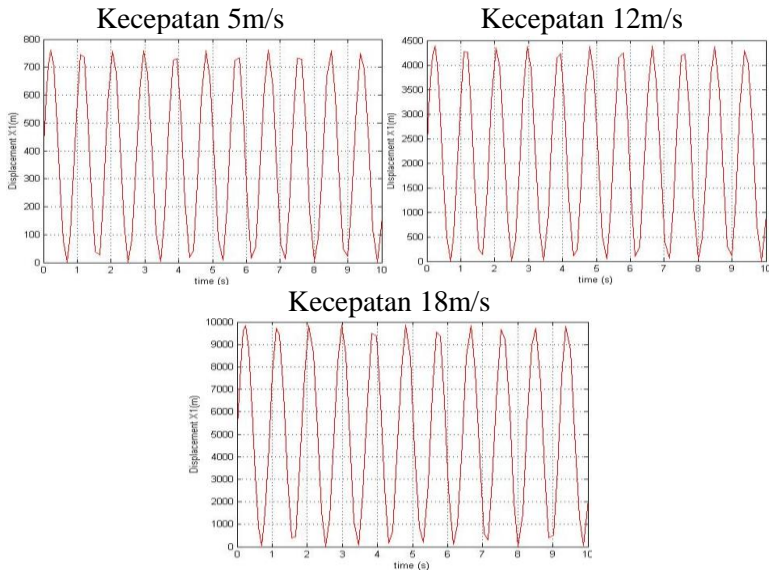
Pada tugas akhir ini, akan dilakukan simulasi untuk sistem turbin angin dengan penambahan TMD. Input yang digunakan saat simulasi ada 2, yaitu pertama, input *bump* yang telah dimodifikasi untuk mengetahui respon dinamis dari turbin angin saat ada angin datang dengan kecepatan mendadak kencang, sehingga menghasilkan respon transien. Kedua, input *sinusoidal* yang menghasilkan respon *steady-state*. Input ini digunakan untuk mengetahui respon dinamis dari turbin angin saat terkena angin dengan kecepatan berubah-ubah dalam range tertentu. Persamaan dari kedua input tersebut dapat dituliskan sebagai berikut.

- Input *bump* yang dimodifikasi

$$y(t) = Y 0.37e^2(\gamma\omega_0 t)e^{-\gamma\omega_0 t} \quad (4.22)$$

- Input *Sinusoidal*

$$y(t) = Y \sin(\omega t) \quad (4.23)$$



Gambar 4. 10 Kecepatan Angin dengan input sinusoidal

Pada persamaan (4.27), nilai Y merupakan amplitudo dimana pada simulasi ini digunakan amplitudo dari besarnya nilai gaya angkat (*lift*) pada kecepatan 5m/s, 12m/s, dan 18m/s. Frekuensi yang akan disimulasikan didapat dari rumus $f = \frac{v}{\lambda}$, dengan variasi kecepatan angin dan nilai λ (panjang gelombang) konstan yaitu sebesar 130m. Setelah itu didapatkan nilai ω , dengan rumus $\omega = 2\pi f$.

4.4.2 Diagram blok sistem turbin angin tanpa TMD

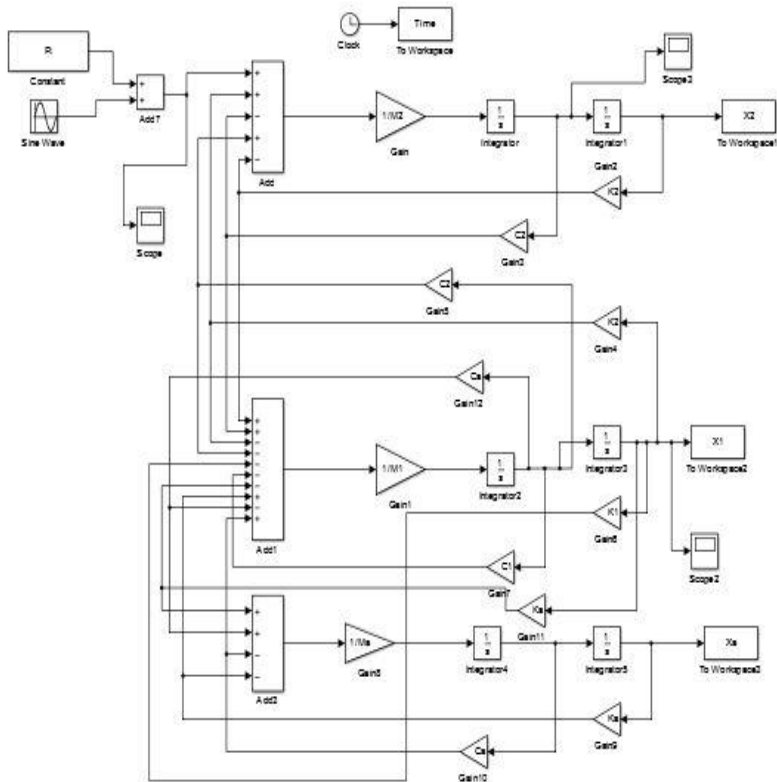
Untuk dilakukan simulasi pada sistem turbin angin tanpa penambahan TMD digunakan input sinusoidal dan *bump* yang telah dimodifikasi dengan γ (*severity parameter*) bernilai 5 untuk *low impact*. Parameter yang digunakan telah dijelaskan pada tabel 3.1.


```

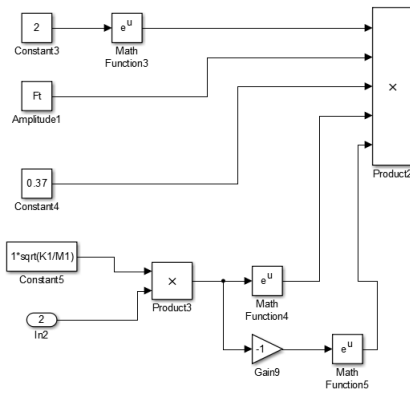
graph LR
    R[R] --> Sum((x))
    Sum --> MF3[Math Function3]
    MF3 --> P3[Product3]
    C3[Constant3] --> P3
    P3 --> Sum
    Sum --> MF4[Math Function4]
    MF4 --> G9[Gain9]
    G9 --> MF5_1[Math Function5]
    MF5_1 --> Sum
    Sum --> MF5_2[Math Function5]
    C4[Constant4] --> MF5_2
    C5[Constant5] --> Sum
  
```

Gambar 4. 12 Diagram Blok Untuk Input *Bump* yang Dimodifikasi

4.4.3 Diagram blok sistem turbin angin dengan menggunakan TMD



Gambar 4. 13 Diagram Blok Untuk Sistem Turbin Angin dengan Penambahan TMD



Gambar 4. 14 Diagram Blok Untuk Input *Bump* yang Dimodifikasi

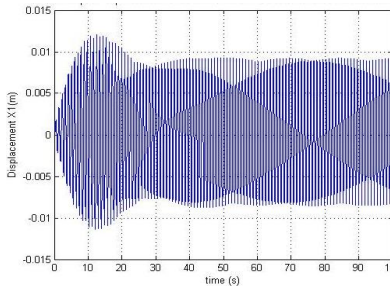
4.5 Analisa Pemodelan

Pemodelan yang dijalankan menggunakan program Matlab Simulink. Model dibuat menjadi sebuah blok diagram beserta M-file dengan *input* yang diberikan berupa variasi kecepatan angin, frekuensi operasi, dan amplitudo eksitasi. Kemudian blok diagram tersebut dijalankan dengan bersamaan dengan M-file yang sesuai sehingga menghasilkan *output* berupa presentase reduksi perpindahan, kecepatan, dan percepatan sistem turbin angin sebagai sistem utama (X1). Setelah itu dilakukan analisa perbandingan grafik respon sistem tanpa TMD dan dengan TMD.

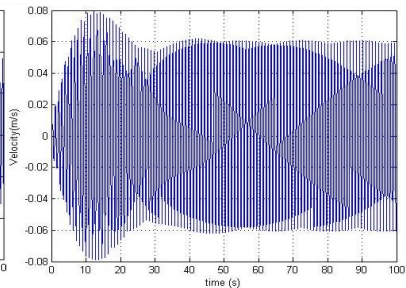
4.5.1 Sistem turbin angin tanpa TMD

4.5.1.1 Respon perpindahan, kecepatan, dan percepatan sistem turbin angin dengan input sinusoidal

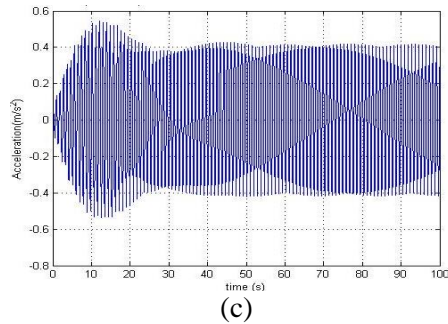
Pemodelan pada sistem turbin angin tanpa penambahan TMD dilakukan dengan menggunakan variasi kecepatan angin, frekuensi operasi, dan amplitudo. Variasi kecepatan angin adalah 5 m/s, 12 m/s, dan 18 m/s. Sistem turbin angin disimulasikan pada frekuensi operasi, memiliki frekuensi natural sebesar 10.8 dan 6.65 rad/s. Pada simulasi, frekuensi operasi yang digunakan yaitu 6.85, 8.854, dan 10.57 yang mana masing-masing terjadi pada saat kecepatan angin 5m/s, 12m/s, dan 18m/s. Amplitudo yang disimulasikan berasal dari gaya angkat yang arahnya tegak lurus dengan turbin angin. Variasi amplitudo berasal dari kecepatan angin kemudian dikonversikan menjadi gaya angkat pada turbin angin, yaitu sebesar 381, 2194.56, dan 4937.76 N.



(a)



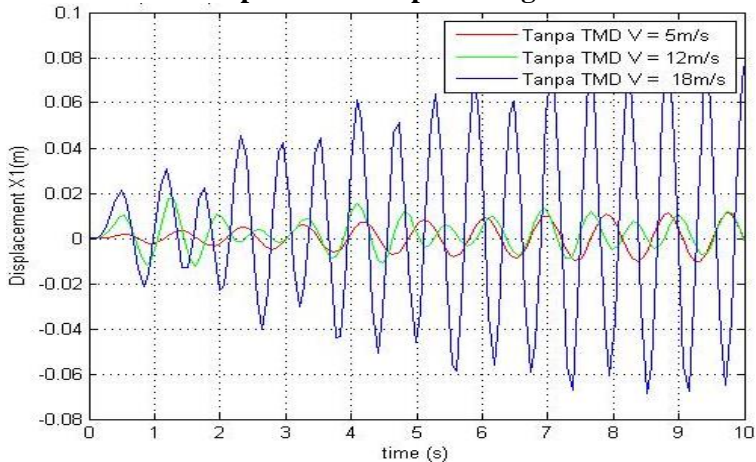
(b)



Gambar 4. 15 Grafik Respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, dan (c) percepatan dari massa utama tanpa TMD dengan input sinusoidal

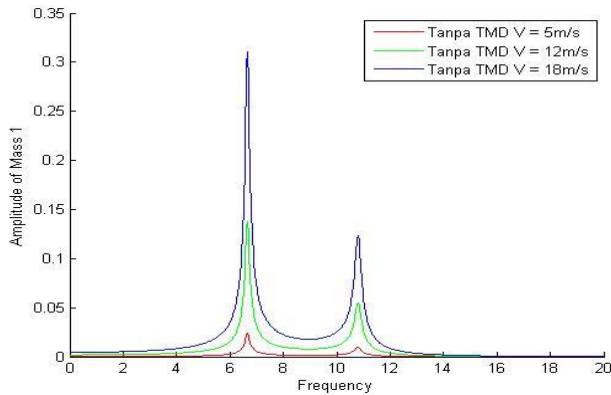
Gambar 4.11 diatas merupakan grafik respon yang ditunjukkan oleh massa utama tanpa TMD yang disimulasikan pada amplitudo 381 N dan frekuensi 6.85 rad/s. Gambar 4.11(a) menunjukkan respon perpindahan dari massa utama (X_1) yang mencapai *steady-state* pada detik ke 30. Gambar 4.11(b) menunjukkan respon kecepatan dari massa utama (\dot{x}_1) mencapai *steady-state* pada detik ke 30. Sedangkan gambar 4.11(c) menunjukkan respon percepatan dari massa utama (\ddot{x}_1) mencapai *steady-state* pada detik ke 30.

4.5.1.1.1 Respon perpindahan massa utama tanpa TMD terhadap variasi kecepatan angin



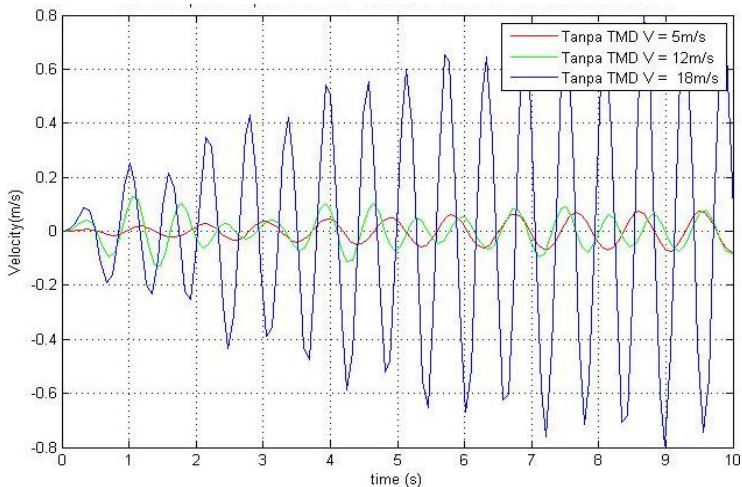
Gambar 4. 16 Grafik Respon Perpindahan Massa Utama (X_1) tanpa TMD dengan Variasi Kecepatan Angin

Gambar 4.12 di atas merupakan grafik perpindahan massa utama tanpa TMD dengan amplitudo masing-masing sebesar nilai gaya angkat pada kecepatan angin 5m/s, 12m/s, dan 18m/s, yaitu 381 N, 2194.56 N, dan 4937.76 N. Garis berwarna merah, hijau dan biru masing-masing adalah respon perpindahan saat kecepatan angin 5m/s, 12m/s, dan 18m/s. Pada saat kecepatan angin 5m/s, 12m/s, dan 18m/s masing-masing memiliki amplitudo terbesar di 0.0113m, 0.0146m, dan 0.0748m. Grafik menunjukkan bahwa semakin besar kecepatan angin mengenai sistem turbin angin maka respon perpindahan sistem akan semakin besar. Hal ini juga ditunjukkan pada grafik *bode diagram* bahwa amplitudo perpindahan terbesar terjadi pada saat kecepatan angin mencapai 18m/s. Di bawah ini merupakan grafik *bode diagram* dari sistem utama tanpa TMD dengan variasi kecepatan.



Gambar 4. 17 Bode Diagram Sistem Turbin Angin Tanpa TMD dengan Variasi Kecepatan Angin

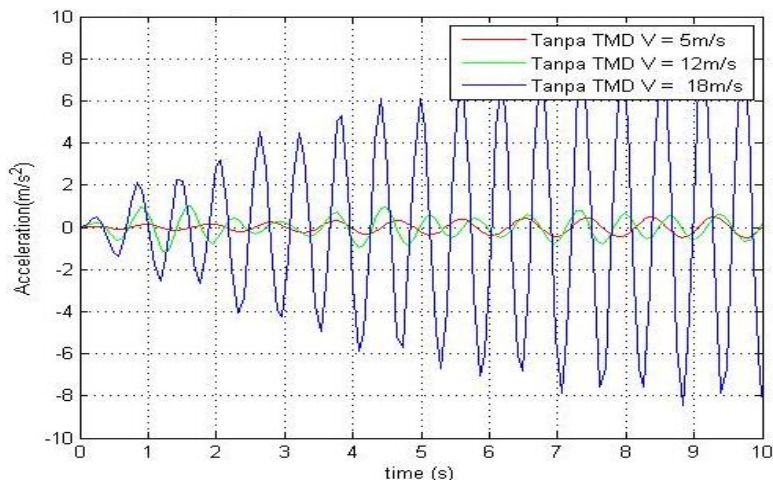
4.5.1.1.2 Respon kecepatan massa utama tanpa TMD terhadap variasi kecepatan angin



Gambar 4. 18 Grafik Respon Kecepatan dari Massa Utama (\dot{x}_1) dengan Variasi Kecepatan Angin

Gambar 4.14 di atas menunjukkan grafik respon kecepatan massa utama tanpa TMD dengan variasi kecepatan angin. Amplitudo yang digunakan pada simulasi ini adalah berupa nilai gaya angkat pada turbin saat masing-masing kecepatan, yaitu 381 N, 2194.56 N, dan 4937.76 N. Garis berwarna merah, hijau dan biru masing-masing adalah respon perpindahan saat kecepatan angin 5m/s, 12m/s, dan 18m/s. Pada saat kecepatan angin 5m/s, 12m/s, dan 18m/s masing-masing memiliki amplitudo terbesar di 0.0738m/s, 0.1175m/s, dan 0.7739m/s. Grafik menunjukkan bahwa semakin besar kecepatan angin mengenai sistem turbin angin maka respon kecepatan sistem akan semakin besar. Grafik berwarna biru merupakan respon kecepatan sistem saat terjadi kecepatan angin sebesar 18m/s. Terjadi amplitudo terbesar pada grafik tersebut daripada yang lain karena frekuensi natural sistem hampir sama dengan frekuensi kerja pada kecepatan angin tersebut.

4.5.1.1.3 Respon percepatan massa utama tanpa TMD terhadap variasi kecepatan angin

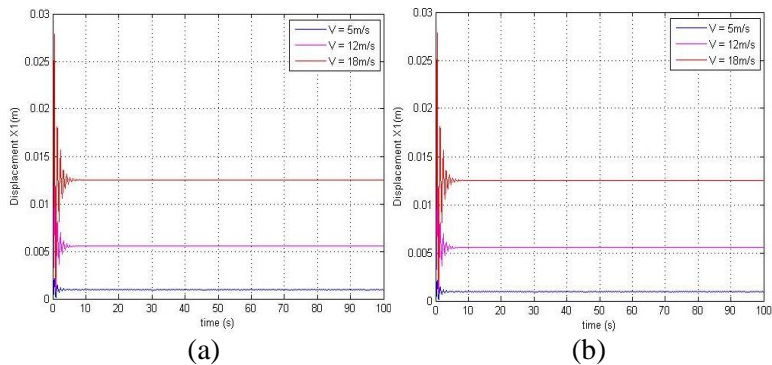


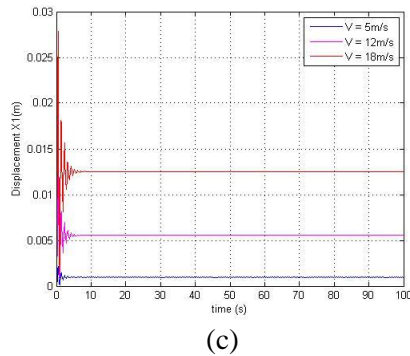
Gambar 4. 19 Grafik Respon Percepatan dari Massa Utama (\ddot{x}_1) dengan Variasi Kecepatan Angin

Gambar 4.15 di atas menunjukkan grafik respon percepatan massa utama tanpa TMD dengan variasi kecepatan angin. Amplitudo yang digunakan pada simulasi ini adalah berupa nilai gaya angkat pada turbin saat masing-masing kecepatan, yaitu 381 N, 2194.56 N, dan 4937.76 N. Garis berwarna merah, hijau dan biru masing-masing adalah respon perpindahan saat kecepatan angin 5m/s, 12m/s, dan 18m/s. Pada saat kecepatan angin 5m/s, 12m/s, dan 18m/s masing-masing memiliki amplitudo terbesar di 0.4902m/s^2 , 1.1247m/s^2 , dan 8.1253m/s^2 . Grafik menunjukkan bahwa semakin besar kecepatan angin mengenai sistem turbin angin maka respon kecepatan sistem akan semakin besar. Grafik berwarna biru merupakan respon kecepatan sistem saat terjadi kecepatan angin sebesar 18m/s. Terjadi amplitudo terbesar pada grafik tersebut daripada yang lain karena frekuensi natural sistem hampir sama dengan frekuensi kerja pada kecepatan angin tersebut.

4.5.1.2 Respon perpindahan, kecepatan, dan percepatan sistem turbin angin dengan input *bump modified*

Pemodelan pada sistem turbin angin tanpa penambahan TMD dilakukan dengan menggunakan variasi kecepatan angin, yaitu pada saat 5m/s, 12m/s, dan 18m/s. Input yang digunakan ialah *bump modified* dengan severity parameter 1, 5, dan 20, serta amplitudo sebesar 2 cm.





Gambar 4. 20 Grafik Respon perpindahan dari Massa Utama dengan penambahan TMD yang diberi Input *bump modified* (a) $\gamma = 1$, (b) $\gamma = 5$, (c) $\gamma = 20$ pada kecepatan angin sebesar 5m/s, 12m/s, dan 18m/s.

Tabel 4. 2 Nilai perpindahan, kecepatan, dan percepatan maksimum pada turbin angin terhadap waktu dengan input *bump modified*.

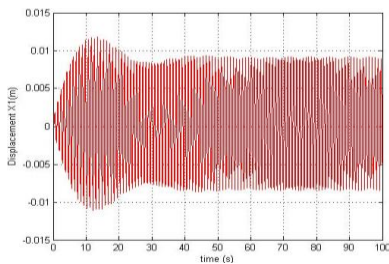
Kecepatan Angin (m/s)	Perpindahan maksimum (m)	Kecepatan maksimum (m/s)	Percepatan maksimum (m/s^2)	Settling time (detik)
5	0,0021	0,008	0,0492	6
12	0,012	0,0446	0,2883	6
18	0,0278	0,1046	0,6347	6

Gambar 4.20 merupakan grafik respon dinamis sistem turbin angin berupa (a) perpindahan, (b) kecepatan, dan (c) percepatan dari massa utama tanpa penambahan TMD dengan input *bump modified*. Dari ketiga grafik tersebut respon *transient* yang didapat hampir sama, yaitu mencapai sebelum 6 detik. Pada tabel 4.1 terlihat bahwa nilai maksimum perpindahan, kecepatan, dan percepatan dari massa utama yang masing-masing besarnya 0.0278 m, 0.1046 m/s, dan 0.6347 m/s^2 , yaitu saat kecepatan terbesar 18m/s.

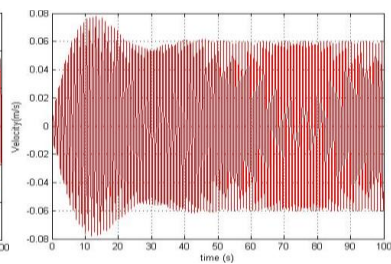
4.5.2 Sistem turbin angin dengan menggunakan TMD

4.5.2.1 Respon perpindahan, kecepatan, dan percepatan sistem turbin angin dengan input sinusoidal

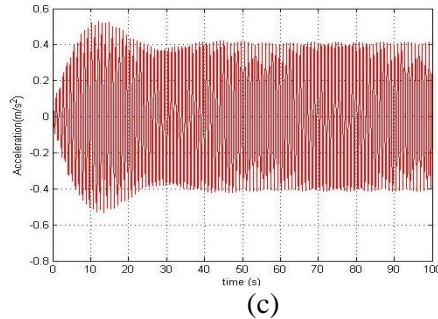
Pemodelan yang dilakukan menggunakan tiga macam variasi, yaitu variasi kecepatan angin, massa absorber (peredam), dan konstanta kekakuan pegas peredam. Simulasi dilakukan selama 10 detik. Pada simulasi, frekuensi operasi yang digunakan yaitu 6.85, 8.854, dan 10.57 yang mana masing-masing terjadi pada saat kecepatan angin 5m/s, 12m/s, dan 18m/s. Sama halnya dengan amplitudo yang digunakan, besarnya amplitudo diambil pada saat kecepatan tersebut. Amplitudo yang disimulasikan berasal dari gaya angkat yang arahnya tegak lurus dengan turbin angin. Variasi amplitudo adalah sebesar 381 N, 2194.56 N, dan 4937.76 N. Sedangkan untuk variasi massa peredam (M_a), konstanta pegas (K_a), dan konstanta redaman (C_a) terlampir pada tabel 3.2.



(a)



(b)

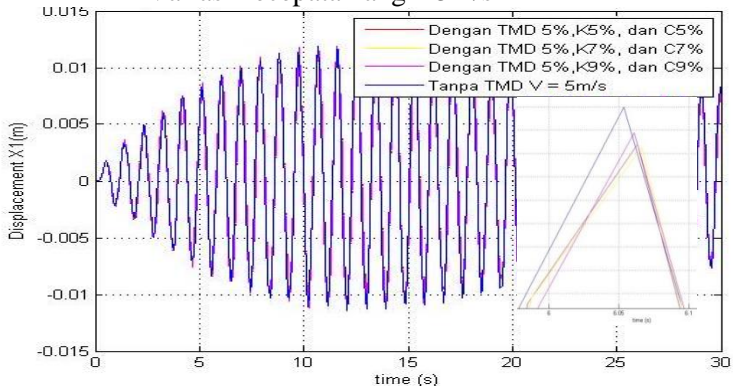


Gambar 4. 21 Grafik Respon (a) perpindahan, (b) Kecepatan, dan (c) Percepatan dari massa utama dengan menggunakan TMD

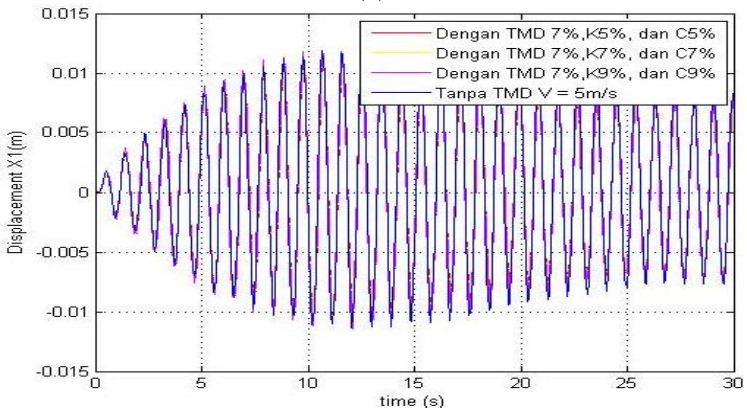
Gambar 4.21 diatas merupakan grafik respon yang ditunjukkan oleh massa utama tanpa TMD yang disimulasikan saat kecepatan angin 5m/s pada amplitudo 381 N dan frekuensi 6.85 rad/s. Sedangkan untuk massa absorber yang digunakan sebesar 5% dari massa utama, yaitu 501kg. Nilai konstanta pegas (K_a) dan redaman (C_a) yang digunakan sebesar 50200.25 N/m dan 1344.023N.s/m. Gambar 4.21(a) menunjukkan respon perpindahan dari massa utama (X_1) yang mencapai *steady-state* pada detik ke 30. Gambar 4.21(b) menunjukkan respon kecepatan dari massa utama (\dot{x}_1) mencapai *steady-state* pada detik ke 30. Sedangkan gambar 4.21(c) menunjukkan respon percepatan dari massa utama (\ddot{x}_1) mencapai *steady-state* pada detik ke 30.

4.5.2.1.1 Respon perpindahan, kecepatan, dan perpindahan massa utama dengan menggunakan TMD terhadap variasi kecepatan angin

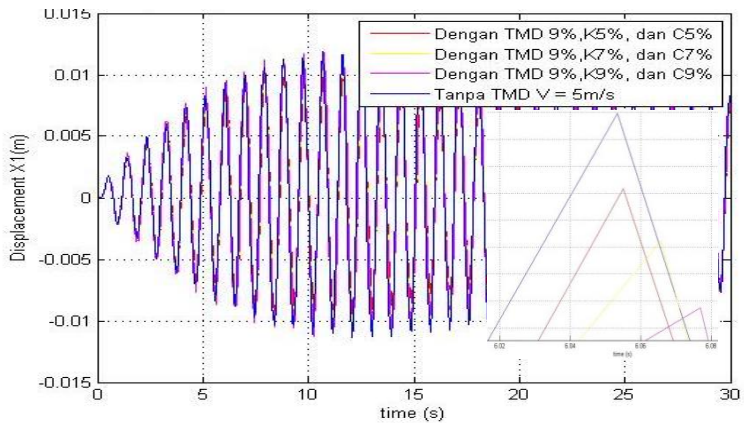
- Variasi kecepatan angin 5m/s



(a)

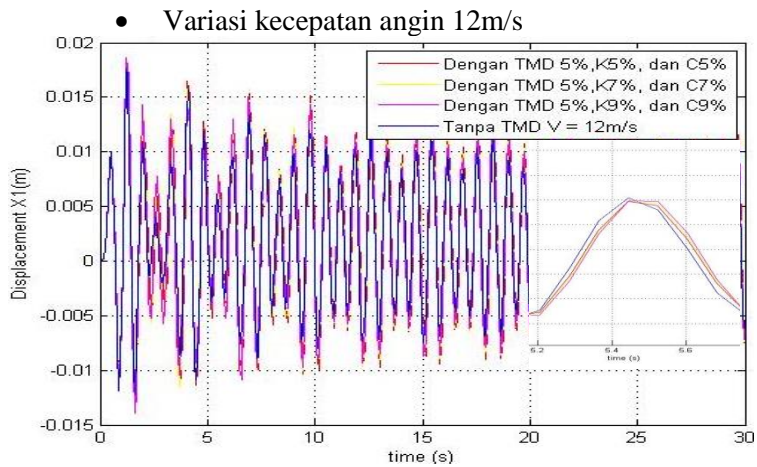


(b)

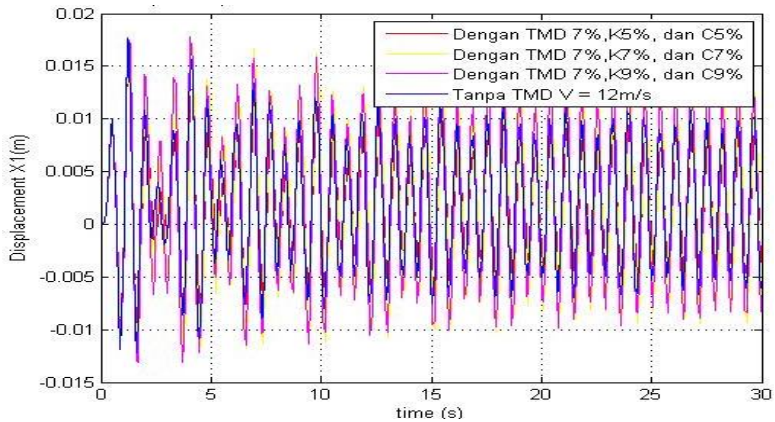


(c)

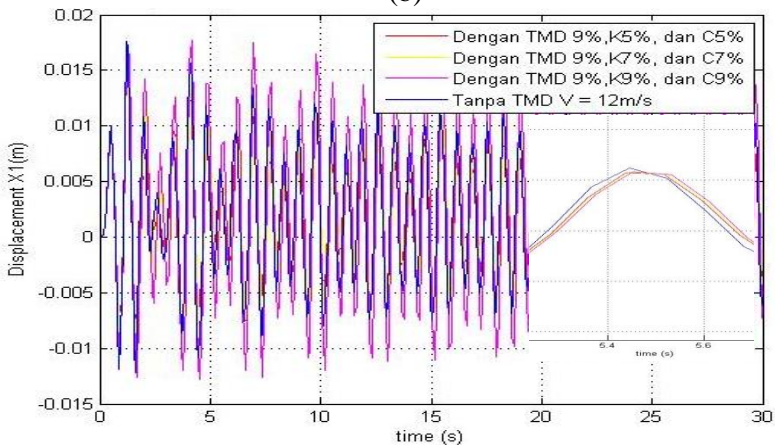
Gambar 4. 22 Grafik Respon perpindahan dengan menggunakan TMD (a) $M_a = 5\%$, (b) $M_a = 7\%$, dan (c) $M_a = 9\%$ dari sistem utama saat kecepatan angin $5m/s$



(a)



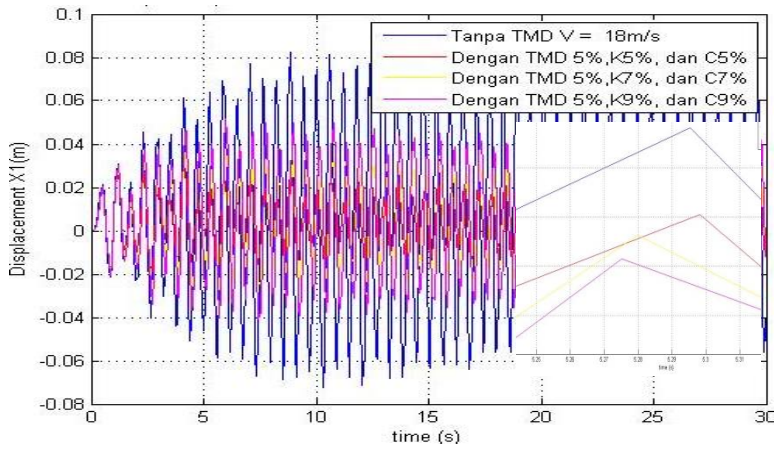
(b)



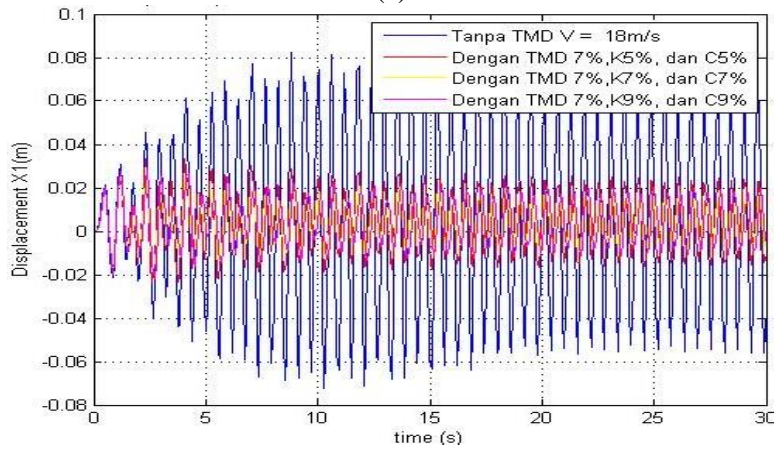
(c)

Gambar 4. 23 Grafik Respon perpindahan dengan menggunakan TMD (a) $Ma=5\%$, (b) $Ma=7\%$, dan (c) $Ma=9\%$ dari sistem utama saat kecepatan angin $12m/s$

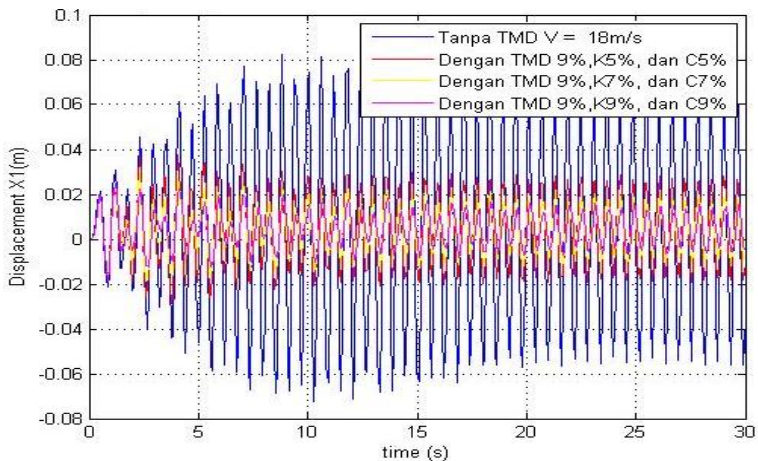
- Variasi kecepatan angin 18m/s



(a)



(b)

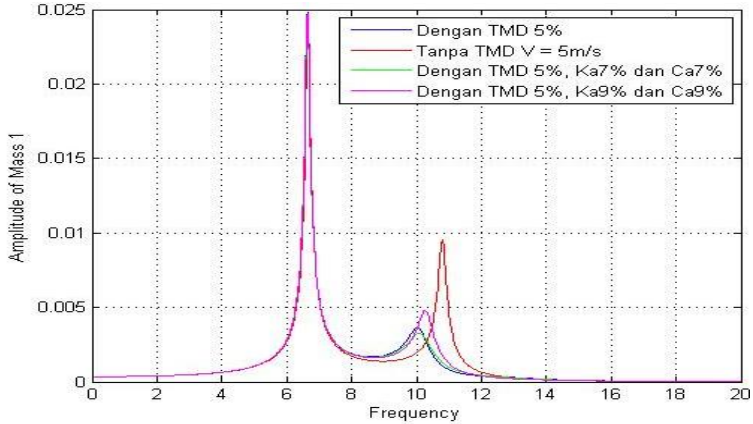


(c)

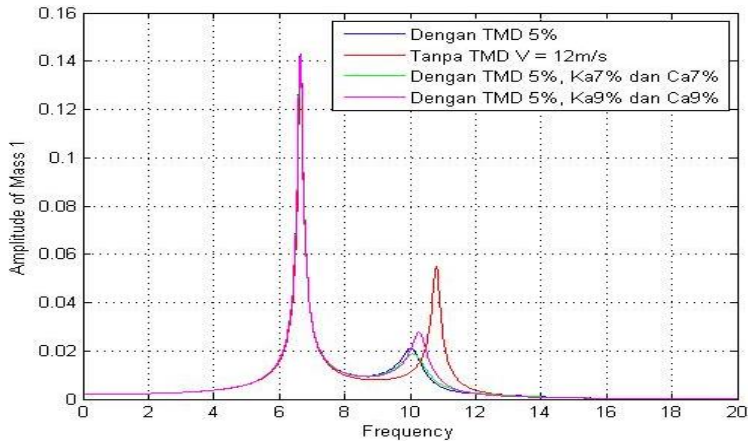
Gambar 4. 24 Grafik Respon perpindahan dengan menggunakan TMD (a) $M_a=5\%$, (b) $M_a=7\%$, dan (c) $M_a=9\%$ dari sistem utama saat kecepatan angin 18m/s

Gambar 4.22, 4.23, 4.24 di atas merupakan grafik-grafik respon perpindahan yang ditunjukkan oleh massa utama yang telah ditambahkan dengan TMD. Pada gambar 4.22 simulasi dilakukan saat kecepatan angin sebesar 5m/s pada frekuensi 6.85 rad/s dan amplitudo 381 N . Pada gambar 4.23, simulasi dilakukan saat kecepatan angin sebesar 12m/s pada frekuensi 8.854 rad/s dan amplitudo 2194.56 N . Sedangkan pada gambar 4.24 simulasi dilakukan saat kecepatan angin sebesar 18m/s pada frekuensi 10.567 rad/s dan amplitudo 4937.76 N . Pada masing-masing gambar, disimulasikan dengan nilai massa peredam yang divariasikan. Gambar (a), (b), dan (c) berturut-turut merupakan grafik respon perpindahan dengan massa peredam sebesar 501 kg , 701.4 kg , dan 901.8 kg . Garis merah menunjukkan respon perpindahan massa utama tanpa penambahan massa peredam. Garis biru menunjukkan respon perpindahan massa utama yang dioperasikan dengan menambahkan massa peredam yang memiliki nilai konstanta pegas dan redaman sebesar 50200.25

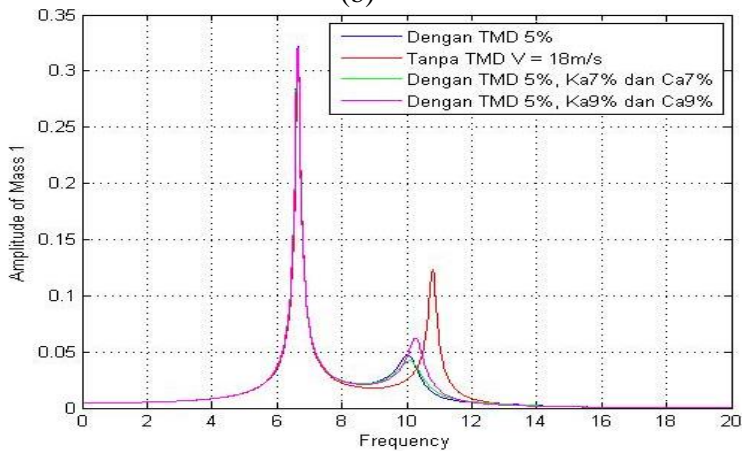
N/m dan 1344.023 N.s/m. Garis hijau menunjukkan respon perpindahan massa utama yang dioperasikan dengan menambahkan massa peredam yang memiliki nilai konstanta pegas dan redaman sebesar 69999.79 N/m dan 1877.872 N.s/m. Garis ungu menunjukkan respon perpindahan massa utama yang dioperasikan dengan menambahkan massa peredam yang memiliki nilai konstanta pegas dan redaman sebesar 88135.62 N/m dan 2389.272 N.s/m. Hasil grafik respon perpindahan menunjukkan bahwa getaran pada sistem turbin angin teredam saat kecepatan rendah 5m/s atau frekuensi 6.85 rad/s dan saat kecepatan tinggi 18m/s atau frekuensi 10.57 rad/s. Semakin besar massa peredam beserta konstanta pegas dan redamannya maka grafik respon menunjukkan sistem utama semakin teredam. Sedangkan saat kecepatan angin mencapai 12m/s atau frekuensi 8.854 rad/s, sistem turbin angin tidak teredam secara menyeluruh. Hal ini juga ditunjukkan pada *bode diagram* di bawah ini bahwa saat frekuensi 8.854 rad/s.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4. 25 *bode diagram* sistem utama dengan penambahan TMD saat kecepatan angin bernilai (a) 5 m/s, (b) 12 m/s, dan (c) 18 m/s dengan variasi massa perdam

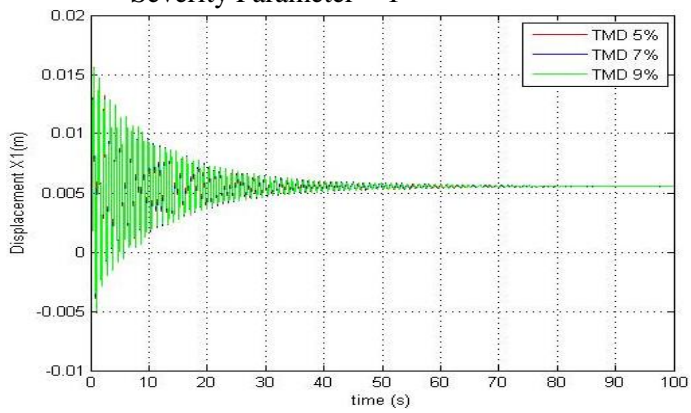
Gambar (a), (b), dan (c) menunjukkan *bode diagram* sistem turbin angin dengan penambahan TMD 5% masing-masing pada saat kecepatan angin sebesar 5m/s, 12m/s, dan 18m/s. Sistem

turbin angin tanpa TMD merupakan sistem 2 DOF kemudian ketika penambahan sistem TMD, sistem turbin angin menjadi sistem 3 DOF. Sistem utama dengan penambahan TMD menyebabkan dua frekuensi natural lama berubah menjadi tiga frekuensi natural baru. Frekuensi natural pertama sistem dengan TMD tidak terlalu bergeser dari frekuensi natural pertama sistem tanpa TMD. Hal ini menyebabkan saat sistem turbin angin terkena frekuensi kerja sebesar 6.85, maka tidak tereduksi secara optimal. Namun untuk frekuensi natural kedua dari sistem tanpa TMD atau sebesar 10.8 rad/s, berubah menjadi 2 frekuensi natural baru yaitu sebesar 10.0083 dan 12.7832 rad/s. Pada gambar terlihat gunung berwarna merah terpecah menjadi 2 gunung baru di setiap variasi massa TMD. Namun untuk TMD 5% hanya terlihat 2 gunung karena gunung pada saat frekuensi natural 12.7832 rad/s terlalu landai serta sistem teredam optimal. Gunung berwarna biru, hijau, dan ungu berturut-turut adalah untuk massa TMD 5% dengan K_a dan C_a 5%, K_a dan C_a 7%, serta K_a dan C_a 9%. Semakin besar massa peredam yang diaplikasikan maka gunung akan bergeser ke kanan dan kiri, sehingga frekuensi natural yang lama akan tereduksi optimal. Hal ini sesuai dengan teori bahwa TMD bekerja optimal saat frekuensi operasi bernilai sama dengan frekuensi kerja.

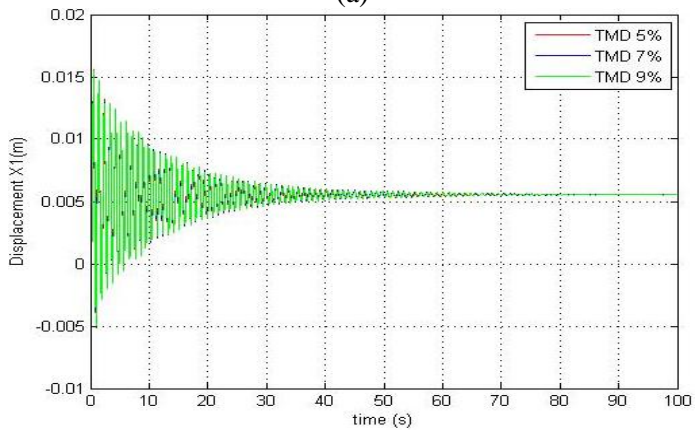
4.5.2.2 Respon perpindahan, kecepatan, dan percepatan sistem turbin angin dengan input *bump modified*

Pemodelan pada sistem turbin angin dengan penambahan TMD dilakukan dengan menggunakan kecepatan angin konstan, yaitu pada saat 12m/s dengan amplitudo konstan berupa gaya angkat sebesar 2194.56 N dan massa peredam sebesar 501 kg, 701.4 kg, dan 901.8 kg. Input yang digunakan ialah *bump modified* dengan severity parameter 1, 5, dan 20 pada masing-masing kecepatan, serta amplitudo sebesar 2 cm.

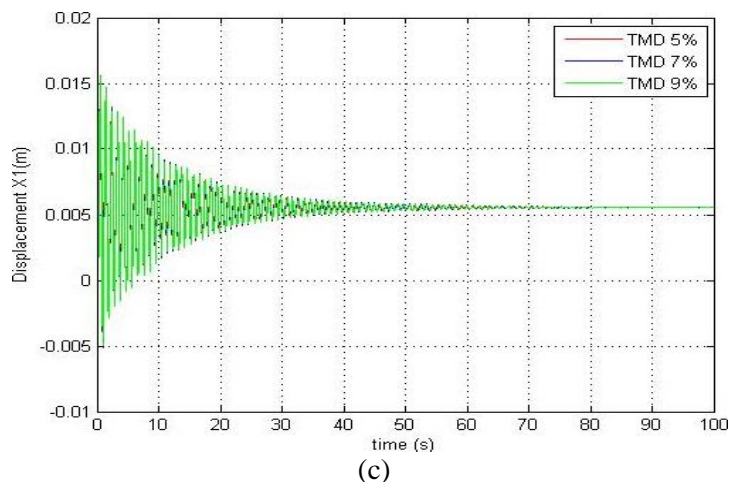
- Severity Parameter = 1



(a)



(b)



Gambar 4. 26 Grafik Respon perpindahan saat kecepatan angin dari Massa Utama dengan penambahan TMD yang diberi Input *bump modified* (a) $\gamma = 1$, (b) $\gamma = 5$, (c) $\gamma = 20$ pada kecepatan angin sebesar 12m/s.

Tabel 4. 3 Nilai perpindahan, kecepatan, dan percepatan maksimum pada turbin angin terhadap waktu dengan input *bump modified*.

Massa TMD (%)	Perpindahan maksimum (m)	Kecepatan maksimum (m/s)	Percepatan maksimum (m/s ²)	Settling time (detik)
5	0,0028	0,011	0,1049	60
7	0,0028	0,0108	0,0996	60
9	0,0028	0,0113	0,0943	60

Gambar 4.26 merupakan grafik respon dinamis sistem turbin angin berupa (a) perpindahan, (b) kecepatan, dan (c) percepatan dari massa utama tanpa penambahan TMD dengan input *bump modified*. Dari ketiga grafik tersebut respon *transient* yang didapat, yaitu mencapai sebelum 60 detik untuk kecepatan angin 5m/s, 12m/s, dan 18m/s. Berbeda dengan saat sistem tanpa

TMD diberi input *bump modified*, sistem mengalami transien sebelum 6 detik. Sehingga massa utama tidak dapat teredam dengan baik. Tabel 4.3 menunjukkan nilai perpindahan maksimum, kecepatan maksimum, dan percepatan maksimum dari massa utama dengan variasi massa peredam. Nilai-nilai pada tabel tersebut mewakili ketiga grafik di atasnya. Nilai maksimum perpindahan antara variasi massa peredam 5%, 7%, dan 9% tidak memiliki perbedaan yang signifikan. Begitu juga antar variasi severity parameter, tidak terjadi perubahan nilai maksimum perpindahan dari massa utama. Berdasarkan nilai maksimum perpindahan, antara sistem turbin angin tanpa dan dengan TMD, nilai tersebut semakin membesar. Oleh karena itu, dari grafik respon perpindahan dari sistem turbin angin tanpa TMD dengan sesudah menggunakan TMD, menghasilkan bahwa sistem TMD tidak efektif untuk meredam getaran pada input *bump modified* karena TMD hanya bisa tereduksi saat ada eksitasi yang berfluktuasi terus menerus atau berupa input sinusoidal.

4.6 Pembahasan

4.6.1 Sistem turbin angin tanpa TMD

Tabel 4. 3 Nilai RMS Perpindahan, Kecepatan, dan Percepatan dari Massa Utama Tanpa TMD

kecepatan tan angin (m/s)	frequency (rad/s)	Amplitude (newton)	rms displacement (m)	rms velocity (m/s)	rms acceleration (m/s ²)
5	6,8544	381	0,0066	0,0449	0,3067
12	8,854	2194,56	0,0064	0,0525	0,4261
18	10,567	4937,76	0,0435	0,4595	4,8397

Data di atas menunjukkan bahwa sistem turbin angin tanpa penambahan TMD mengalami getaran yang semakin besar

seiring meningkatnya frekuensi kerja dan amplitudo konstan berupa gaya angkat angin terhadap turbin.

4.6.2 Sistem turbin angin dengan menggunakan TMD

Pada simulasi kali ini dilakukan pada kecepatan angin bervariasi, yaitu saat 5m/s, 12m/s, dan 18m/s. Frekuensi beserta amplitudo

- **Variasi $M_a = 5\%$ dari massa utama**

Tabel 4. 4 Nilai RMS Perpindahan, Kecepatan, dan Percepatan dari Massa Utama dengan Menggunakan TMD Variasi Massa Peredam 5%, $K_a = 50200.25\text{N/m}$, dan $C_a = 1344.023\text{N.s/m}$

Kecepatan angin (m/s)	frequency (rad/s)	rms displacement (m)	rms velocity (m/s)	rms acceleration (m/s^2)	reduction displacement (%)
5	6,8544	0,0064	0,0438	0,2978	3,03
12	8,854	0,0076	0,064	0,5588	-18,75
18	10,567	0,0127	0,1214	1,273	70,81

Tabel 4. 5 Nilai RMS Perpindahan, Kecepatan, dan Percepatan dari Massa Utama dengan Menggunakan TMD Variasi Massa Peredam 5%, $K_a = 69999.79\text{N/m}$, dan $C_a = 1877.872\text{N.s/m}$

Kecepatan angin (m/s)	frequency (rad/s)	rms displacement (m)	rms velocity (m/s)	rms acceleration (m/s^2)	reduction displacement (%)
5	6,8544	0,0065	0,044	0,2995	1,52
12	8,854	0,0623	0,0435	0,545	-873,44
18	10,567	0,0179	0,1803	1,8845	58,85

Tabel 4. 6 Nilai RMS Perpindahan, Kecepatan, dan Percepatan dari Massa Utama dengan Menggunakan TMD Variasi Massa Peredam 5%, $K_a = 88135.62\text{N/m}$, dan $C_a = 2389.272\text{N.s/m}$

Kecepatan angin (m/s)	frequency (rad/s)	rms displacement (m)	rms velocity (m/s)	rms acceleration (m/s^2)	reduction displacement (%)
5	6,8544	0,0065	0,0441	0,3001	1,52
12	8,854	0,0608	0,0423	0,5326	-850
18	10,567	0,0268	0,2784	2,9146	38,39

• **Variasi $M_a = 7\%$ dari massa utama**

Tabel 4. 7 Nilai RMS Perpindahan, Kecepatan, dan Percepatan dari Massa Utama dengan Menggunakan TMD Variasi Massa Peredam 7%, $K_a = 50200.25\text{N/m}$, dan $C_a = 1344.023\text{N.s/m}$

Kecepatan angin (m/s)	frequency (rad/s)	rms displacement (m)	rms velocity (m/s)	rms acceleration (m/s^2)	reduction displacement (%)
5	6,8544	0,0062	0,0424	0,2888	6,06
12	8,854	0,005	0,0439	0,3773	21,88
18	10,567	0,015	0,1468	1,548	65,52

Tabel 4. 8 Nilai RMS Perpindahan, Kecepatan, dan Percepatan dari Massa Utama dengan Menggunakan TMD Variasi Massa Peredam 7%, $K_a = 69999.79\text{N/m}$, dan $C_a = 1877.872\text{N.s/m}$

Kecepatan angin (m/s)	frequency (rad/s)	rms displacement (m)	rms velocity (m/s)	rms acceleration (m/s^2)	reduction displacement (%)
5	6,8544	0,0064	0,0435	0,2958	3,03
12	8,854	0,0082	0,0692	0,603	-28,12
18	10,567	0,01	0,0941	0,9768	77,01

Tabel 4. 9 Nilai RMS Perpindahan, Kecepatan, dan Percepatan dari Massa Utama dengan Menggunakan TMD Variasi Massa Peredam 7%, $K_a = 88135.62\text{N/m}$, dan $C_a = 2389.272\text{N.s/m}$

Kecepatan angin (m/s)	frequency (rad/s)	rms displacement (m)	rms velocity (m/s)	rms acceleration (m/s ²)	reduction displacement (%)
5	6,8544	0,0064	0,0437	0,2976	3,03
12	8,854	0,0081	0,0461	0,6025	-26,56
18	10,567	0,012	0,1094	1,132	72,41

• **Variasi $M_a = 9\%$ dari massa utama**

Tabel 4. 10 Nilai RMS Perpindahan, Kecepatan, dan Percepatan dari Massa Utama dengan Menggunakan TMD Variasi Massa Peredam 9%, $K_a = 50200.25\text{N/m}$, dan $C_a = 1344.023\text{N.s/m}$

Kecepatan angin (m/s)	frequency (rad/s)	rms displacement (m)	rms velocity (m/s)	rms acceleration (m/s ²)	reduction displacement (%)
5	6,8544	0,0057	0,0386	0,2629	13,64
12	8,854	0,0052	0,041	0,3544	18,75
18	10,567	0,0171	0,1724	1,8221	60,69

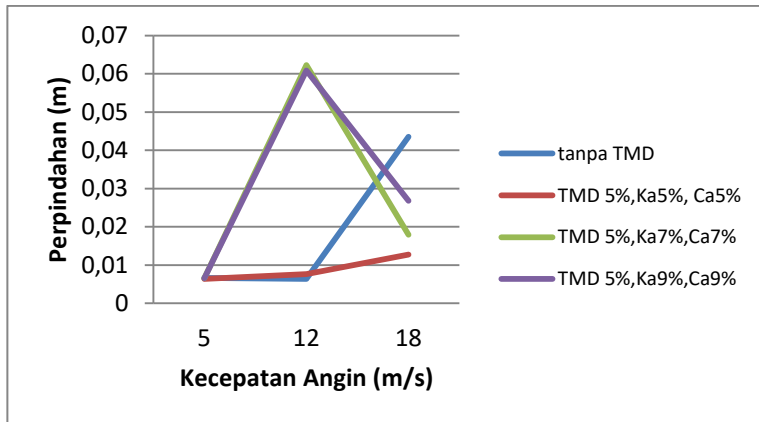
Tabel 4. 11 Nilai RMS Perpindahan, Kecepatan, dan Percepatan dari Massa Utama dengan Menggunakan TMD Variasi Massa Peredam 9%, $K_a = 69999.79\text{N/m}$, dan $C_a = 1877.872\text{N.s/m}$

Kecepatan angin (m/s)	frequency (rad/s)	rms displacement (m)	rms velocity (m/s)	rms acceleration (m/s ²)	reduction displacement (%)
5	6,8544	0,0062	0,0423	0,2882	6,06
12	8,854	0,0058	0,0461	0,3957	9,37
18	10,567	0,0116	0,109	1,1404	73,33

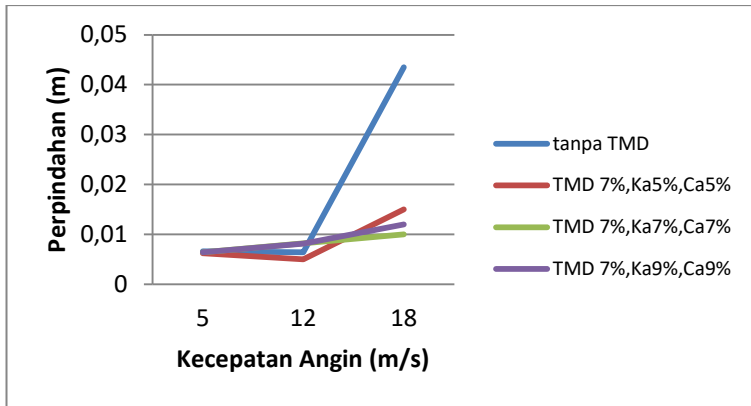
Tabel 4. 12 Nilai RMS Perpindahan, Kecepatan, dan Percepatan dari Massa Utama dengan Menggunakan TMD Variasi Massa Peredam 9%, $K_a = 88135.62 \text{ N/m}$, dan $C_a = 2389.272 \text{ N.s/m}$

Kecepatan angin (m/s)	frequency (rad/s)	rms displacement (m)	rms velocity (m/s)	rms acceleration (m/s ²)	reduction displacement (%)
5	6,8544	0,0063	0,0431	0,2934	4,54
12	8,854	0,0085	0,0723	0,6288	-32,81
18	10,567	0,0092	0,0791	0,8137	78,85

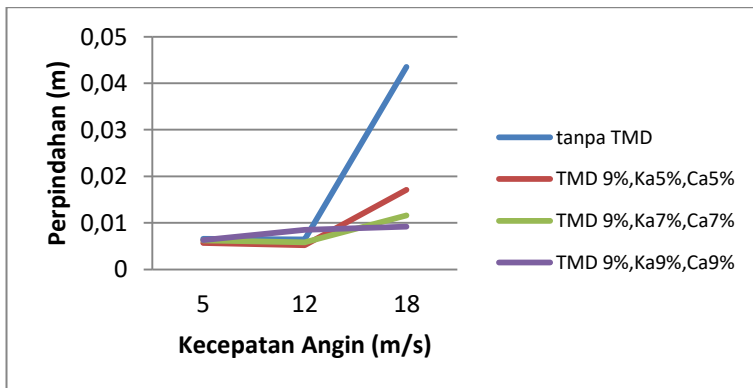
Tabel-tabel di atas merupakan nilai RMS perpindahan, kecepatan, dan percepatan dari massa utama dengan variasi nilai konstanta pegas dan redaman TMD. Data tersebut dapat dibuat grafik pada masing-masing variasi massa peredam.



Gambar 4. 27 Grafik Respon RMS perpindahan dari massa utama dengan penambahan TMD 5% variasi K_a dan C_a terhadap perubahan kecepatan angin



Gambar 4. 28 Grafik Respon RMS perpindahan dari massa utama dengan penambahan TMD 7% variasi Ka dan Ca terhadap perubahan kecepatan angin



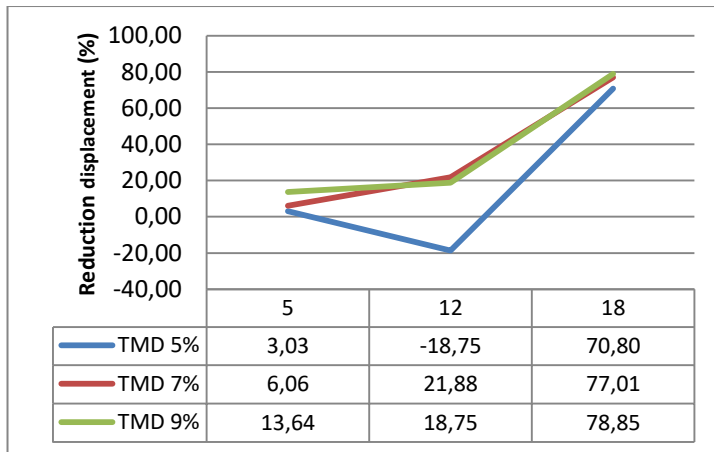
Gambar 4. 29 Grafik Respon RMS perpindahan dari massa utama dengan penambahan TMD 9% variasi Ka dan Ca terhadap perubahan kecepatan angin

Dari gambar di atas dapat dilihat respon perpindahan dari massa utama dengan penambahan TMD kemudian diberi input kecepatan angin 5m/s, 12m/s, dan 18m/s yang dikonversikan menjadi gaya angkat sebesar 381, 2194.56, dan 4937.76 N pada

turbin angin. Hasil dari respon perpindahan menunjukkan bahwa penambahan TMD mampu mereduksi secara baik pada saat frekuensi kerja tinggi sedangkan saat frekuensi rendah, TMD tidak banyak menghasilkan redaman yang signifikan. Untuk kecepatan angin 5m/s atau frekuensi 6.85 rad/s, TMD hanya mampu meredam getaran sistem utama mencapai 13.64% pada pemasangan massa peredam 9%, nilai konstanta pegas dan redaman 50200.25 N/m dan 1344.023 N.s/m. Saat 12m/s atau frekuensi 8.854 rad/s, TMD mampu mereduksi mencapai 21.88% pada pemasangan massa peredam 7%, nilai konstanta pegas dan redaman 50200.25N/m dan 1344.023N.s/m. Sedangkan saat kecepatan angin 18m/s atau frekuensi 10.57 rad/s, TMD mampu meredam getaran sistem utama mencapai 78.85% pada pemasangan TMD 9%. Pada masing-masing grafik respon RMS perpindahan di atas, semakin besar konstanta pegas dan redaman yang terpasang pada TMD, menunjukkan bahwa sistem utama semakin teredam. Untuk sistem TMD sendiri, tabel-tabel RMS menyatakan bahwa saat variasi massa peredam sebesar 5% (501 kg), prosentase reduksi terbesar terjadi ketika nilai konstanta pegas dan redaman masing-masing 50200.25 N/m, dan 1344.023 N.s/m, yaitu sebesar 70.8%. Namun untuk variasi massa peredam 7% (701.4 kg), saat konstanta pegas dan redaman senilai 69999.79 N/m dan 1877.872 N.s/m, mampu mereduksi hingga 77,01% . Sementara massa peredam 9% (901.8 kg) dengan nilai konstanta 88135.62 N/m dan 2389.272N.s/m, mampu mereduksi hingga 78.85%.

Gambar 4.30 di bawah dapat dilihat saat kecepatan angin 18m/s dengan penambahan massa peredam 9%, respon perpindahan massa utama massa utama mengalami reduksi terbesar yaitu sebesar 78.85%. Begitu juga saat kecepatan 5m/s, respon perpindahan massa utama mengalami reduksi terbesar mencapai 13.64%. Saat kecepatan 12m/s dengan massa peredam 7%, respon perpindahan massa utama mengalami reduksi terbesar mencapai 21.88%. Namun apabila dilihat grafik secara menyeluruh, mulai dari frekuensi rendah hingga tinggi, garis

berwarna merah dan hijau memiliki trend grafik meningkat, berbeda dengan grafik biru. Hal ini menunjukkan bahwa rata-rata untuk frekuensi kerja saat 5m/s sampai 12m/s, optimal tereduksi oleh massa peredam 7%, sedangkan untuk 12m/s sampai 18m/s optimal tereduksi oleh massa peredam 9%. Dari grafik dapat disimpulkan bahwa massa peredam yang paling efektif untuk semua frekuensi adalah 7% dan 9% dari massa utama.



Gambar 4. 30 Grafik reduksi perpindahan terbesar (%) berdasarkan variasi massa TMD

Pada grafik respon perpindahan juga terlihat bahwa semakin besar frekuensi kerja yang diberikan, maka redaman yang diberikan semakin besar. Hal ini sudah sesuai teori bahwa frekuensi berbanding lurus dengan perpindahan maupun kecepatan juga berbanding lurus dengan gaya redam yang dihasilkan.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Telah dirancang sistem turbin angin sebagai sumber getar yang memiliki tower 31 m. Getaran pada sistem hanya terjadi dalam arah translasi horizontal.
2. Telah dirancang massa peredam (*Tuned Mass Damper*) dimensi 0.6 x 0.4 x 0.4 m dengan bahan baja. Sistem ini berfungsi untuk mereduksi getaran arah translasi horizontal yang diakibatkan oleh sistem utama.
3. Sistem turbin angin TMD dengan input bump modified memiliki respon transient lebih lama daripada sistem tanpa TMD. Sistem tanpa TMD memiliki settling time 6 detik, sedangkan sistem turbin angin dengan TMD memiliki settling time rata-rata 60 detik. Hal ini menunjukkan bahwa sistem TMD tidak efektif bekerja untuk mereduksi getaran saat ada perubahan kecepatan angin mendadak tinggi sesaat.
4. Pemasangan TMD pada turbin angin, bekerja efektif (reduksi mencapai 78.85%) pada frekuensi kerja tinggi atau saat kecepatan angin sebesar 18m/s senilai dengan 10.57 rad/s. Sedangkan untuk frekuensi kerja rendah atau saat kecepatan 5m/s senilai dengan 6.85 rad/s, TMD tidak bekerja kurang optimal (reduksi hanya mencapai 13.63%). Walaupun demikian, TMD tetap meredam getaran sistem utama karena kedua kondisi berada dekat dengan frekuensi natural sistem turbin angin. Namun, untuk kecepatan angin 12m/s senilai dengan 8.854 rad/s, TMD tidak mampu bekerja optimal (reduksi mencapai 21.88% hanya saat variasi massa peredam 7%).

5. Seluruh TMD yang divariasikan memiliki karakteristik reduksi yang tidak berbeda jauh satu sama lain. TMD dengan Massa Peredam 9%, $K_a = 88135.62 \text{ N/m}$, dan $C_a = 2389.272 \text{ N.s/m}$ dan massa peredam 7%, $K_a = 69999.79 \text{ N/m}$, dan $C_a = 1877.872 \text{ N.s/m}$ mampu mereduksi getaran paling baik pada kecepatan 5m/s, 12m/s, dan 18m/s.

5.2 Saran

Adapun saran untuk penelitian tugas akhir selanjutnya adalah

:

1. Perlu dilakukan adanya eksperimen untuk pengujian TMD guna meredam getaran pada sistem turbin angin agar dapat membandingkan kemudian menyesuaikan antara hasil simulasi dengan eksperimen.
Perlu ditinjau ulang penggunaan TMD untuk uji eksperimen. Penggunaan TMD pada sistem turbin angin tidak efektif untuk frekuensi kerja rendah, namun saat frekuensi tinggi sistem TMD akan bekerja mereduksi sistem utama secara optimal.

DAFTAR PUSTAKA

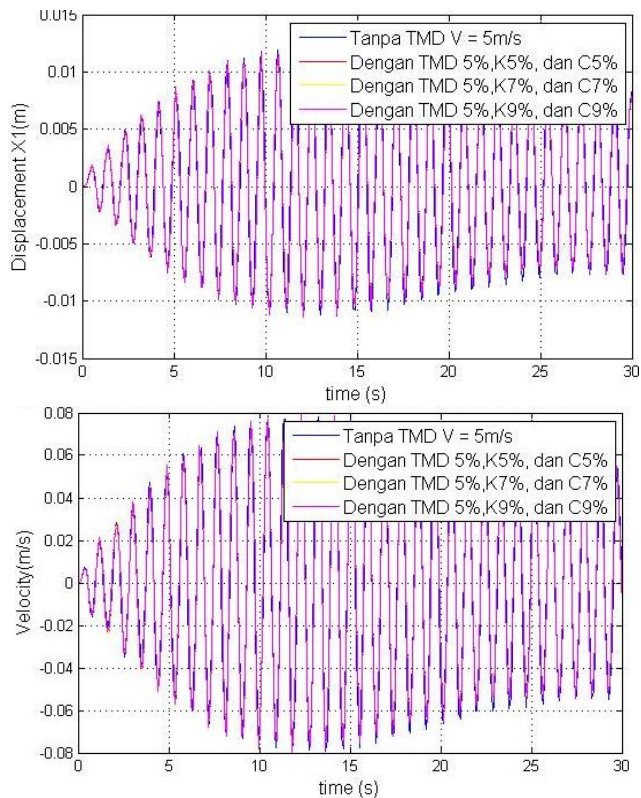
- Anon., 2003. *Wind Energy Solution*. [Online] Available at:<https://windenergysolutions.nl/turbines/wes80/>[Di akses 17 April 2017].
- Anon., 2011. *Pembangkit Listrik Tenaga Angin*. [Online] Available at:<http://www.community.gunadarma.ac.id> [Diakses 10 April 2017].
- Bagaskara, S., 2008. *Analisa Pemanfaatan Turbin Angin Sebagai Penghasil Energi Listrik Alternatif di Pulau Panggang Kepulauan Seribu*, Surabaya: Digilib ITS.
- Chen, J. & Georgakis, C. T., 2013. *Tuned Rolling-Ball Dampers for Vibration Control*. *Journal of Sound and Vibration* 332, pp. 5271-5282.
- Hadi, D. F., Sunaryati, J. & Ferial, R., 2009. *Studi Efektifitas Penggunaan Tuned Mass Damper Untuk Mengurangi Pengaruh Beban Gempa pada Struktur Bangunan Tinggi dengan Layout Bangunan Berbentuk "U"*. Volume V.
- Ikhsan, I. & Hipi, M. A., 2011. *Analisis Pengaruh Pembebanan Terhadap Kinerja Kincir Angin Tipe Propeller pada Wind Tunnel Sederhana*, Makassar: Universitas Hasanuddin.
- Napitupulu, F. H. & Napitupulu, E. K., 2014. *Uji Performansi Turbin Angin Tipe Darrieus-H dengan Profil Sudu NACA 0012 dan Analisa Perbandingan Efisiensi Menggunakan Variasi Jumlah Sudu dan Sudut Pitch*, Medan: Universitas Sumatera Utara.
- Rachman, A., 2010. *Analisis dan Pemetaan Potensi Energi Angin di Indonesia*, Depok: Digilib UI.

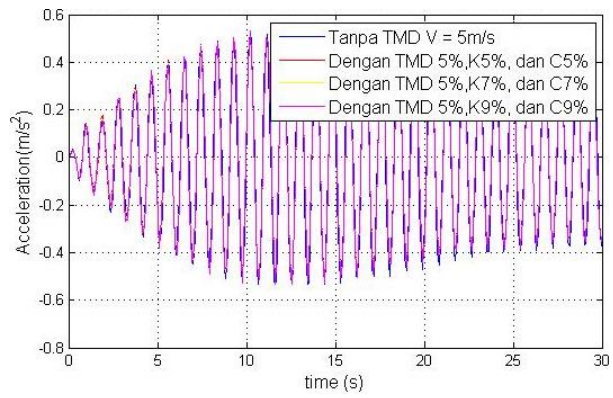
- Rahmawati, I., 2016. *Pemodelan dan Analisis Pengaruh Perubahan Parameter Sistem Suspensi Hydro-Pneumatic Terhadap Gaya Redam dan Gaya Pegas Serta Respon Dinamis Mobil*, Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Rao, S. S., 2011. *Mechanical Vibration*. Miami: Pearson Education, Inc..
- Stewart, G. M. & Lackner, M. A., 2014. *The impact of passive tuned mass dampers and wind-wave. Elsevier Engineering Structures* 73, pp. 54-61.

LAMPIRAN

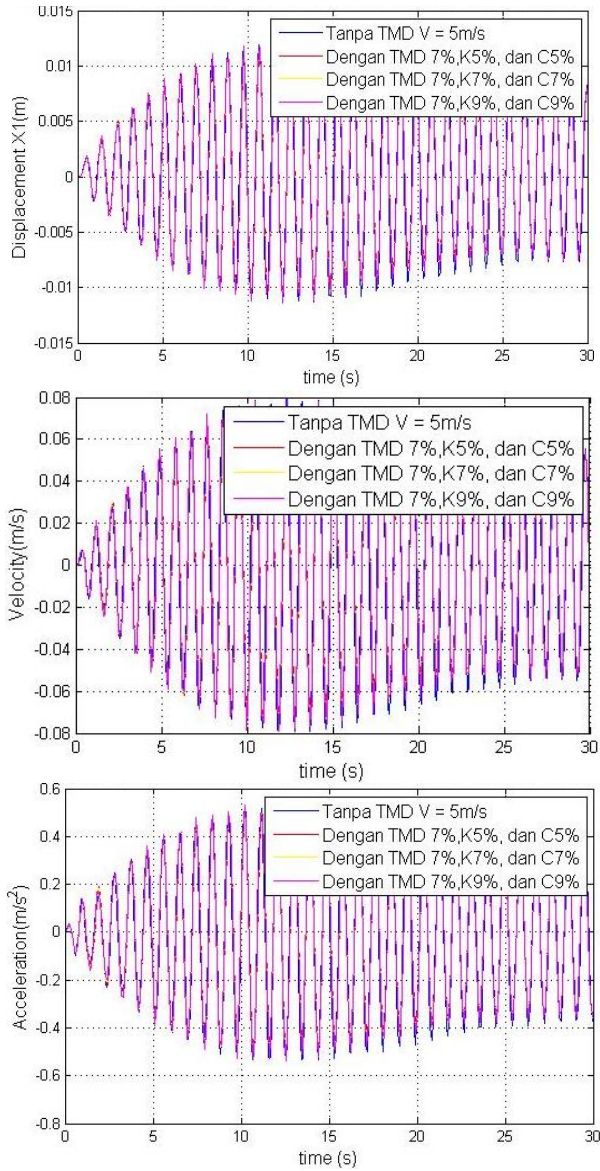
1. Hasil simulasi Matlab Simulink

- Respon perpindahan, kecepatan, dan percepatan saat kecepatan 5m/s
 - **Variasi TMD 5%**

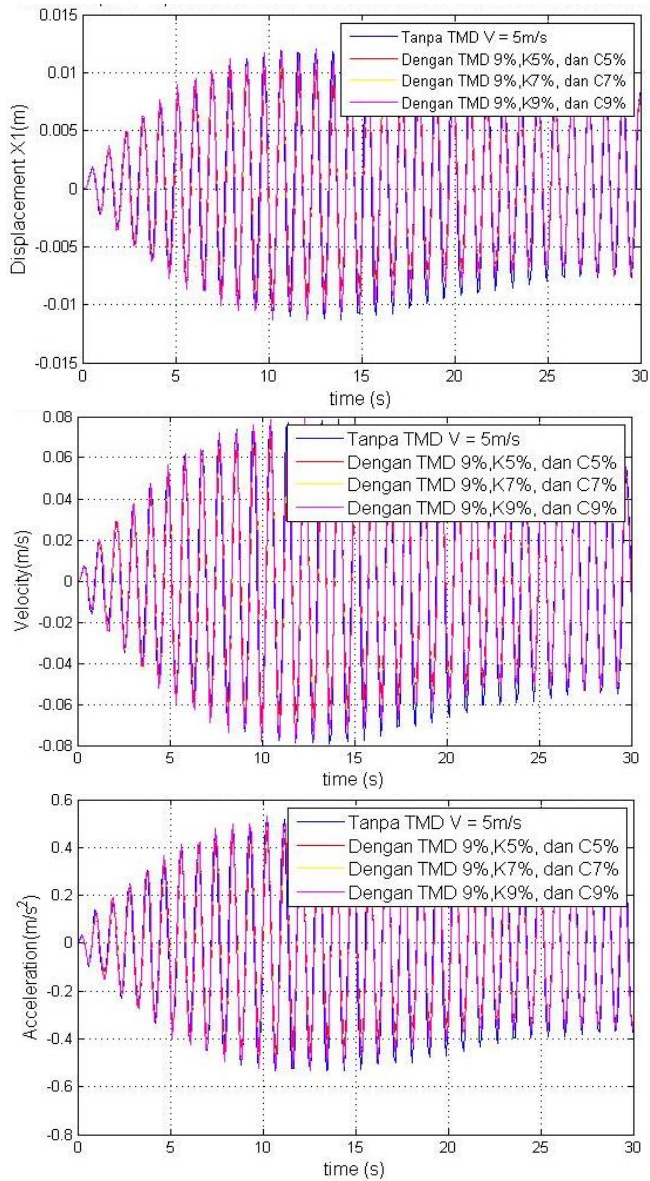




○ Variasi TMD 7%

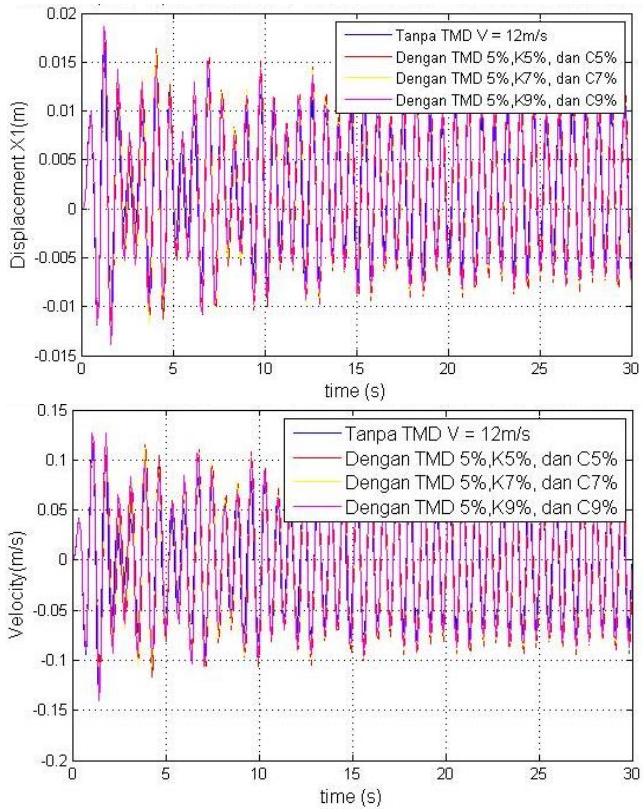


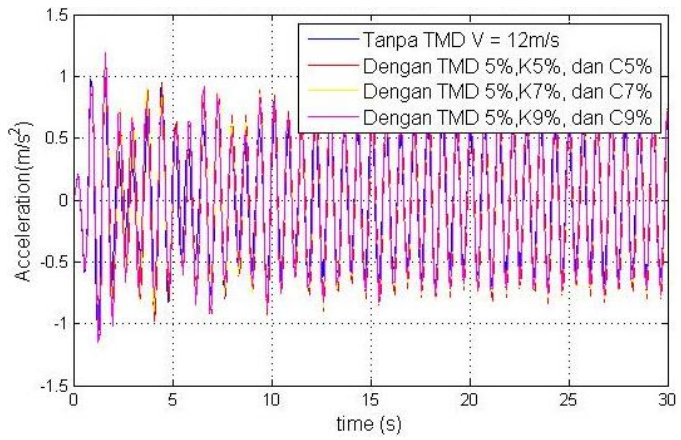
○ Variasi TMD 9%



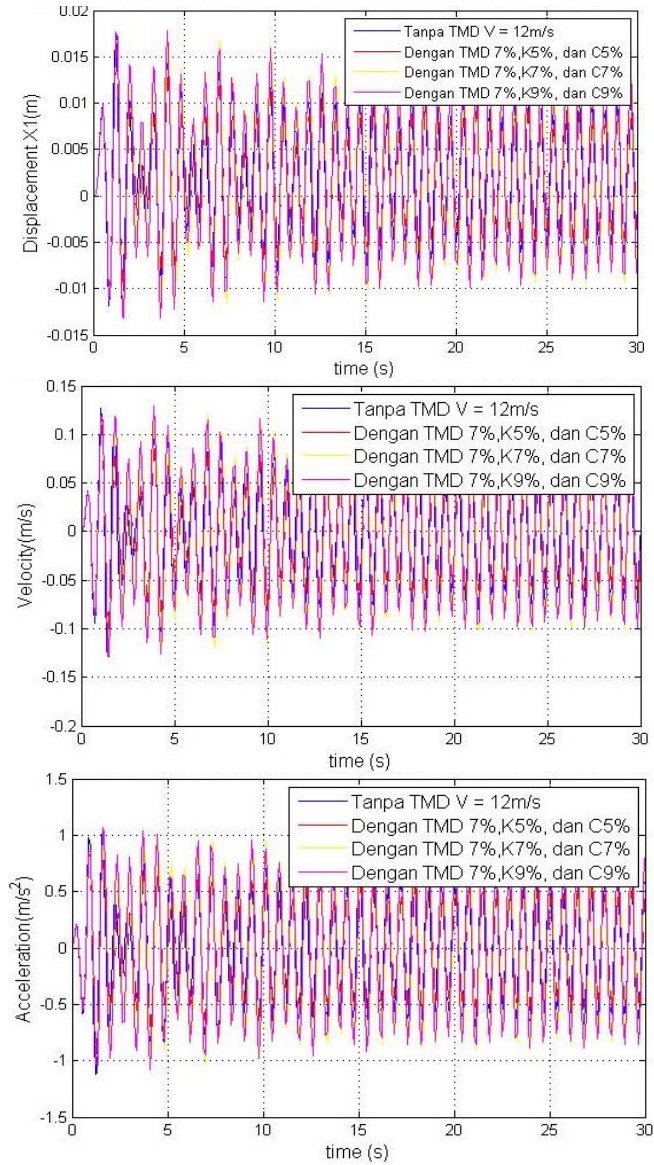
- Respon perpindahan, kecepatan, dan percepatan saat kecepatan 12m/s

○ **Variasi TMD 5%**

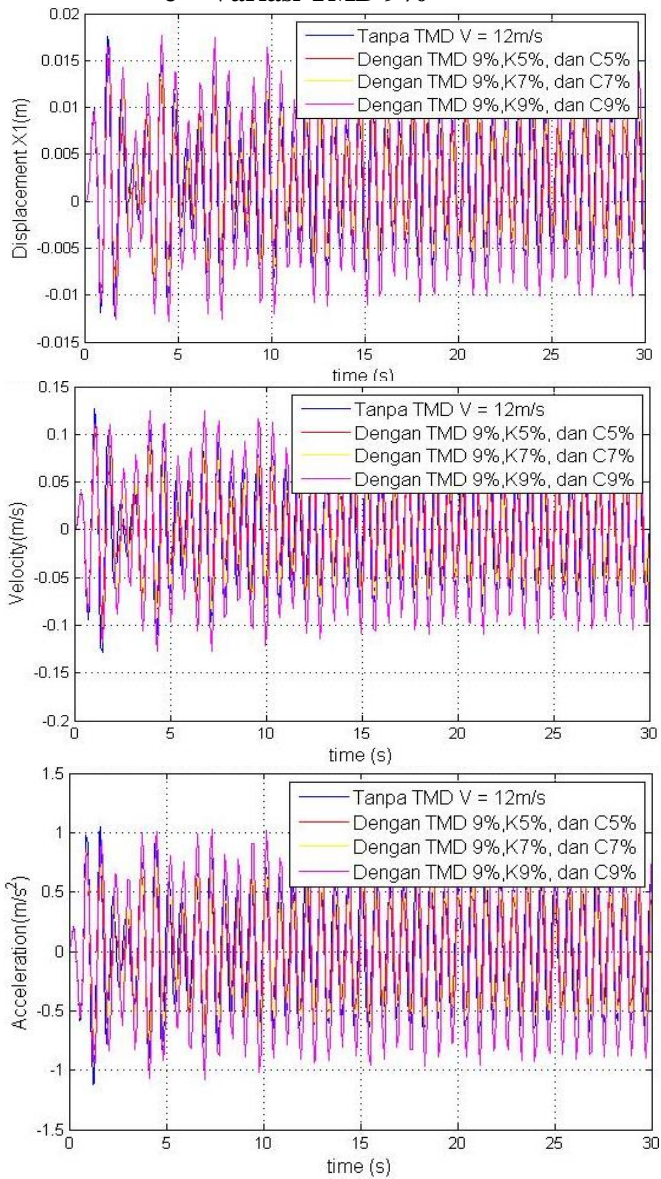




○ Variasi TMD 7%

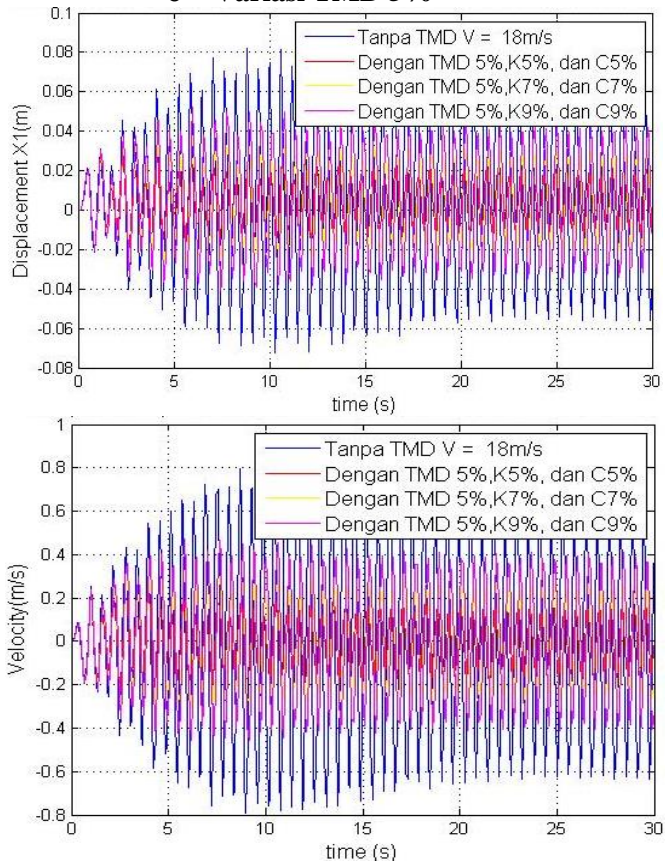


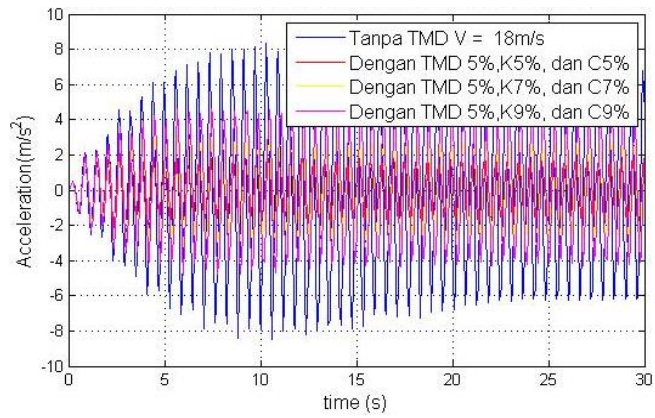
○ **Variasi TMD 9%**



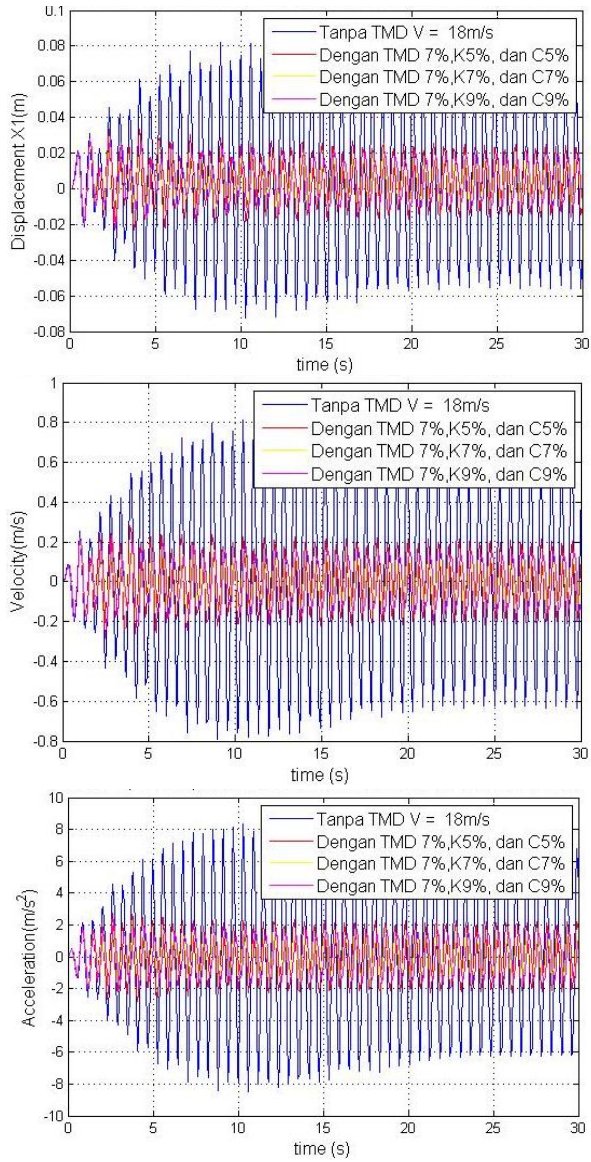
- Respon perpindahan, kecepatan, dan percepatan saat kecepatan 18m/s

○ **Variasi TMD 5%**

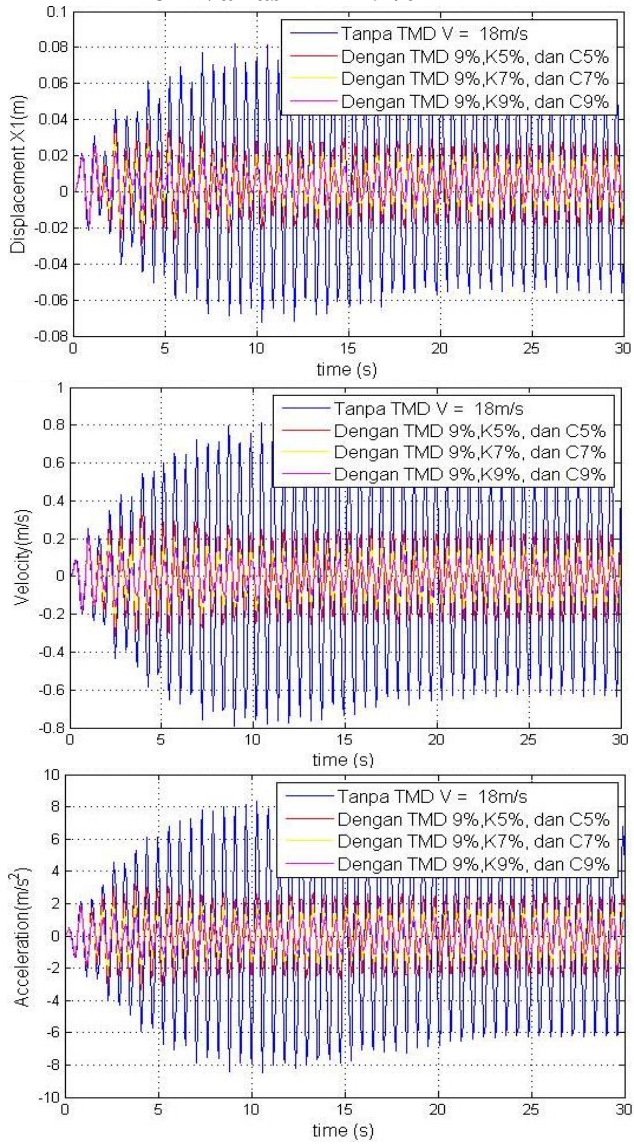




○ Variasi TMD 7%

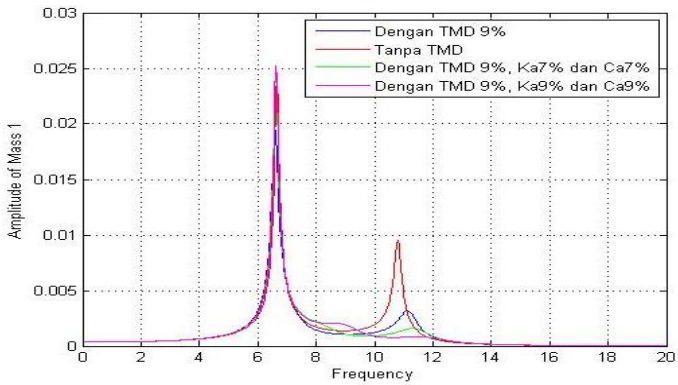
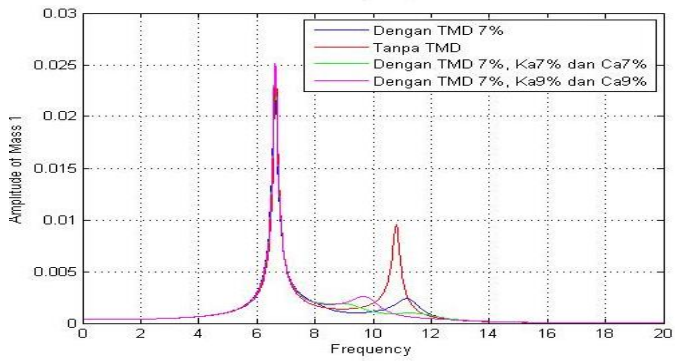
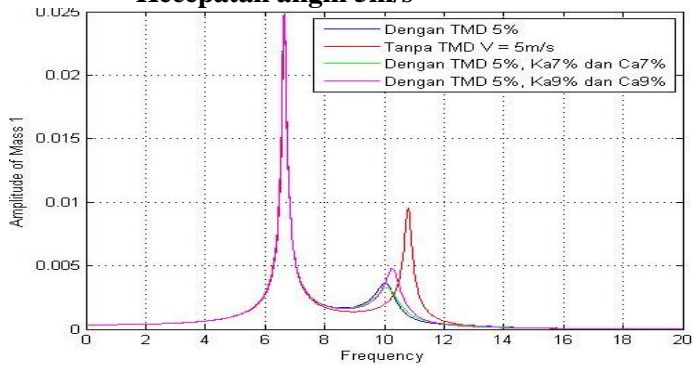


○ **Variasi TMD 9%**

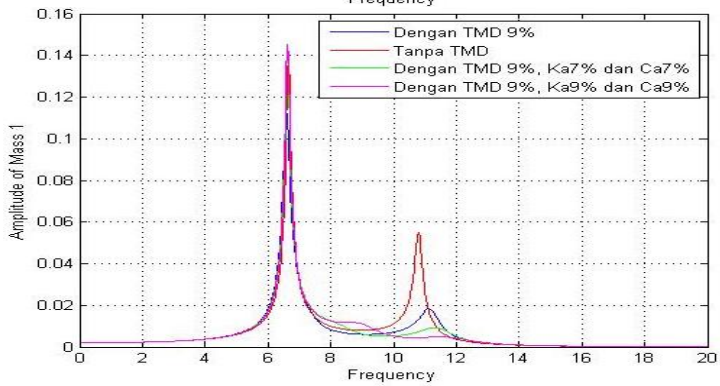
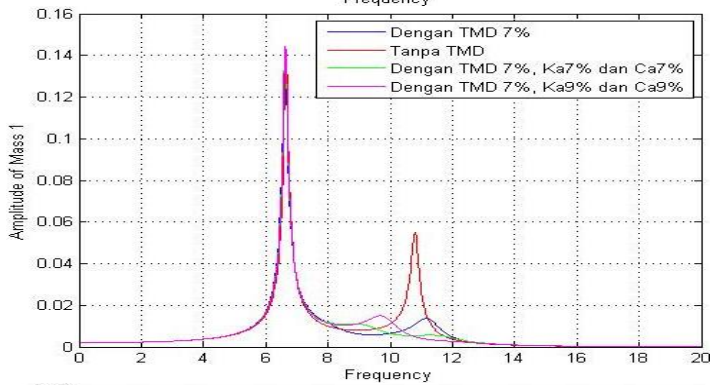
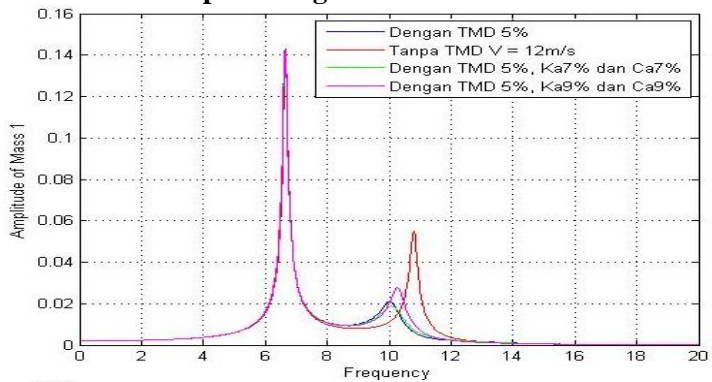


2. Hasil bode diagram

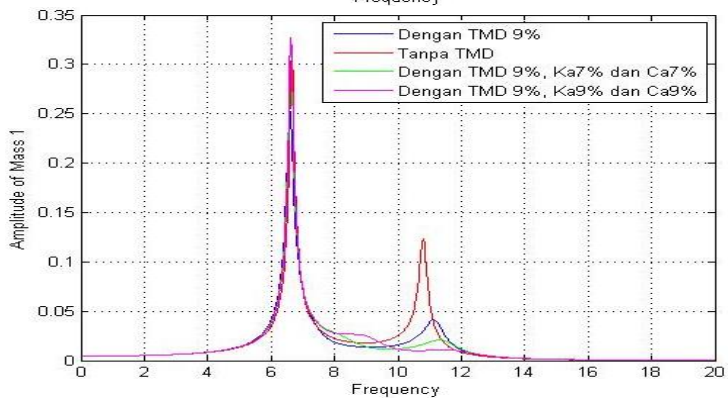
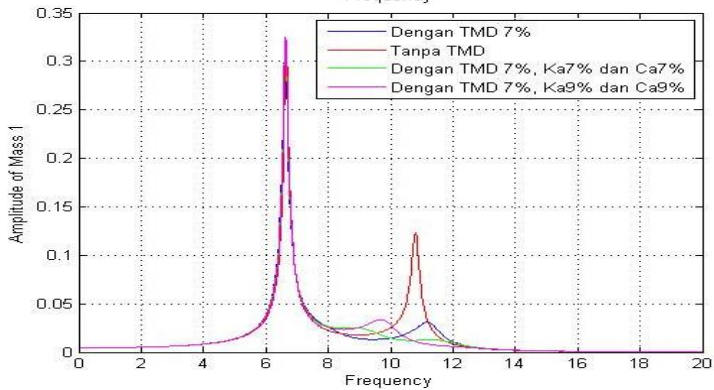
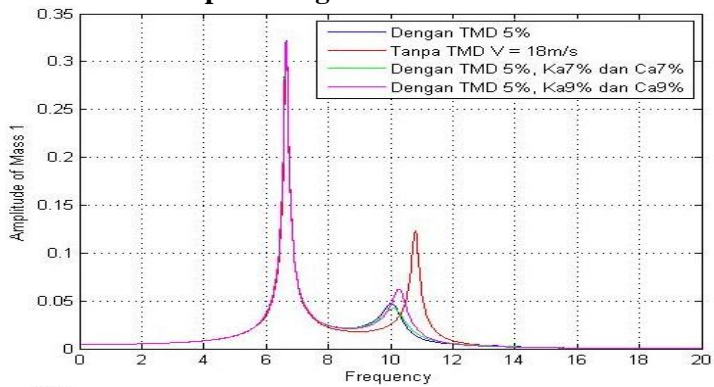
• Kecepatan angin 5m/s



- Kecepatan angin 12m/s



- Kecepatan angin 18m/s



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BIODATA PENULIS



Putri Sarah Aida dilahirkan di Surabaya, 28 Desember 1994 anak yang terlahir dari orangtua terbaik bernama Samsul Arifin dan Jenny Muharti. Riwayat pendidikan penulis diawali di SD Muhammadiyah 4 Pucang, Surabaya pada tahun 2001-2007. Setelah itu melanjutkan pendidikan di SMPN 16 Surabaya pada tahun 2007-2010. Kemudian melanjutkan ke SMAN 1 Sooko, Mojokerto pada tahun 2010-2013. Lalu penulis melanjutkan ke jenjang perkuliahan S1 di Departemen Teknik Mesin di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya melalui jalur SNMPTN Undangan.

Penulis aktif dalam kegiatan akademik maupun organisasi selama perkuliahan. Penulis juga pernah menjadi asisten dosen di kelas maupun asisten Laboratorium Vibrasi dan Sistem Dinamis. Dalam organisasi kemahasiswaan, penulis aktif menjadi staff Departemen Hubungan Luar di Himpunan Mahasiswa Mesin (HMM) FTI ITS tahun 2014-2015. Pada tahun 2015-2016, penulis aktif menjadi sekretaris Departemen Hubungan Luar HMM FTI ITS.

Penulis mempunyai motto hidup “*Dimana ada kesusahan, disitu ada jalan keluar karena Allah Maha Bijaksana*” yang membuat penulis berusaha untuk selalu *positive thinking* dalam menghadapi segala kondisi dan keadaan. Hal ini dapat menjadikan penulis lebih bersemangat dan berusaha keras untuk membanggakan orang sekitarnya. Untuk semua informasi dan masukan terkait tugas akhir ini dapat menghubungi penulis melalui email putrisarahaida68@gmail.com.